

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail - Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE / SCIENCES,
TECHNOLOGIE ET GEOSCIENCES
(CRFD/STG)

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE PHYSIQUE ET APPLICATIONS

E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Site web: www.uy1researchstg.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCE,
TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES
(CRFD/STG)

DOCTORATE RESEARCH UNIT FOR
PHYSICS AND APPLICATIONS

E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Web site: www.uy1researchstg.cm

LABORATOIRE D'ENERGIE, DES SYSTEMES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES
ENERGY LABORATORY, ELECTRICALS AND ELECTRONICS SYSTEMS

**ANALYSE THERMOECONOMIQUE D'UN SYSTEME DE
STOCKAGE DE CARNOT**

*Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master of
Science en Physique*

Spécialité : Energie, systèmes électriques et électroniques

Option : Energie et environnement

Par :

KENFACK VOPE Christianne

Matricule : **19F2385**

Licencié en Physique



Sous la direction de :

FOTSING METEGAM Isabelle Flora, Chargé de Cours
IUT-FV, Université de Dschang

Et

EDONGUE Hervais, Chargé de Cours
Université de Yaoundé 1

Année 2024

DEDICACE

A

Ma tendre mère pour son soutien et ses encouragements,

Je t'aime

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à Dieu et aux personnes qui nous ont apporté leur précieux soutien tout au long de cette étude. Nous tenons à témoigner notre reconnaissance envers les personnes suivantes :

- Aux Professeurs **NDJAKA Jean-Marie B.** et **SIMO Elie**, respectivement Chef du Département de Physique et Chef du laboratoire d'Energie et Environnement de l'Université de Yaoundé 1, pour l'accueil dans cette merveilleuse filière. Chers Professeurs, nous vous remercions sincèrement pour votre soutien, votre compréhension, votre confiance et surtout pour vos précieux conseils et votre disponibilité tout au long de ce travail.

- A mes encadrateurs et modèles Dr. **FOTSING METEGAM Isabelle Flora**, Chargé de Cours à IUT-F.V de l'Université de Dschang et au Dr. **EDONGUE Hervais**, Chargé de Cours à Université de Yaoundé 1 et mes **Jurys de soutenance** pour leur disponibilité, leurs conseils, leurs critiques constructives et leurs encouragements tout au long de mon parcours académique et surtout lors du déroulement de ce travail d'initiation à la recherche scientifique.

- Nous tenons également à remercier tous les enseignants du Département de physique de la Faculté des Sciences, en particulier le Pr. **BEN-BOLIE G.H.**, Pr. **NJANDJOCK NOUCK P.**, Pr. **HONA Jacques**, Pr. **KUETCHE KAMGANG V.**, Pr. **NANA ENGO S.G.**, Dr. **WANDJI William**, Dr. **KAMENI Modeste** et bien d'autres pour leurs conseils et leurs encouragements tout au long de notre parcours académique.

-A mes aînés académiques : le Dr. **CHARA-DACKOU V.S** et les Doctorants **ARMEL ZAMBOU K.** et **MFOUNDIKOU Mouhamed** pour leur soutien, leurs conseils avisés, leur disponibilité et surtout pour leurs critiques constructives et encouragements.

- A mes camarades de promotion et surtout mes amis de l'équipe de recherche, pour leur disponibilité et leur modeste contribution tout au long de la réalisation de ce travail.

- A mon cher père **VOPE Bernard** et ma chère mère **TSAFACK Solange**, pour leur soutien et leur accompagnement depuis le début de mes études.

- Mes chers frères **Ronyl, Ulrich, Arsène** et ma sœur **Léa** pour leur réconfort et précieux soutien.

Nous sommes reconnaissants envers toutes ces personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à notre parcours et à la réalisation de ce travail et donc les noms ne figurent pas dans ce document.

Table des matières

DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
Liste des figures	vi
Liste des Tableaux.....	vii
Liste de symboles et abréviations.....	viii
Résumé.....	x
Abstract	xi
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE	5
Introduction	5
I.1. Généralités sur les cycles thermodynamiques.....	5
I.1.1. Cycle de Rankine	6
I.1.2. Cycle de Brayton	8
I.1.3. Cycle Otto.....	10
I.1.4. Cycle Diesel	11
I.2. Système de stockage d'énergie thermique	13
I.2.1. Stockage d'énergie thermique sensible (S-SET).....	13
I.2.2. Stockage thermochimique	14
I.2.3. Stockage de l'énergie par chaleur latente.....	14
I.3. Cas du stockage Carnot	15
I.3.1. Principe du stockage de Carnot	16
I.3.2. Quelques travaux récents.....	17
Conclusion.....	20
CHAPITRE II MATERIEL ET METHODE	22
Introduction	22
II.1. Modèle Physique	22
II.1.1. Diagramme schématique d'une batterie Carnot (BC)	22
II.1.2. Description du modèle physique	23
II.2. Bilan énergétique sur le système.....	25
II.2.1. Mode recharge.....	25
II.2.2. Mode décharge	27
II.2.3. Evaluation des performances du système puissance-puissance	29

II.2.4. Evaluation des performances exergetique	29
II.3. Modèle économique	30
II.4. Procédure de résolution numérique	30
II.5. Procédure de validation numérique	32
Conclusion.....	32
CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSION	34
Introduction	34
III.1. Résultats d'analyse énergétique.....	34
III.3. Résultats d'analyse économique.....	40
Conclusion.....	43
Conclusion générale et perspectives.....	45
Bibliographie et webographie	48

Liste des figures

Figure I.1: illustration du cycle de rankine [4].....	6
Figure I.2 Illustration du cycle de brayton [9].....	8
Figure I.3. Illustration des cycles otto et diesel [9]	10
Figure I.4. Système de stockage d'énergie thermique [15].....	13
Figure I.5. Différentes technologies de batterie Carnot	15
Figure I. 6. Principe de base du stockage de Carnot [46].....	16
Figure I.7. Station de stockage d'énergie électrique sous forme de chaleur [49]	19
Figure II.1.Diagramme schématique d'une batterie Carnot (BC)	22
Figure II.2.Modèle physique d'un système de stockage HP-ORC Carnot.....	23
Figure II.3.Diagramme T-s du système de batterie Carnot HP-ORC	24
Figure III.1. Variation de l'énergie totale générée en fonction de la température de stockage thermique.....	35
Figure III.2.Variation de l'efficacité P2P en fonction de la température de stockage thermique	36
Figure III.3.Rendement du cycle en fonction de la température de stockage thermique	37
Figure III.4.Evolution du COP en fonction de la température de stockage thermique	38
Figure III.5.Evaluation de l'efficacité exergétique en fonction de la température de stockage.....	38
Figure III.6.Sensibilité de la puissance du compresseur par rapport à l'efficacité P2P	39
Figure III.7.Le coût du cycle de stockage en fonction de la température de stockage thermique	41
Figure III.8.Evaluation de coût du cycle de stockage en fonction de la température de stockage thermique et de la capacité de la batterie	42
Figure III.9.Coûts initiaux des différents composants du système	43

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Paramètres caractéristiques de différentes technologies de stockage d'énergie [50]	14
Tableau II.2. Données d'entrées.....	31
Tableau II.3 Validation numérique	32

Liste de symboles et abréviations

<i>Lettres latines</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>
C	Chaleur spécifique	kJ/kg.K
H	Enthalpie	J/kg
M	Masse	Kg
<i>m</i>	Débit massique	kg/s
<i>Q</i>	Flux de chaleur	kJ/h
S	Entropie	kJ/kg.K
T	Température	°C
V	Volume	m ³
<i>w</i>	Puissance	W
W	Travail	J
X	Qualité de la vapeur	-
<i>lettres grecques</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>
<i>η</i>	Efficacité	-
<i>ρ</i>	Densité	kg/m ³
<i>Indices</i>	<i>Description</i>	
Amb	Ambiant	
Char	Charge	
Com	Compresseur	
Dis	Décharge	
E	Énergie	
Eva	Évaporateur	
H	Haut	
In	Entrée	
Max	Maximale	
Min	Minimal	
Out	Sortir	
P	Pouvoir	
Round	Aller-retour	
S	Stockage	
sc	Température de décharge	
<i>Abréviations</i>	<i>Description</i>	
CAES	Stockage d'énergie à air comprimé	
COP	Coefficient de performance	

GWP	Potentiel de réchauffement planétaire
HP	Pompe à chaleur
HX	Échangeur de chaleur
ORC	Cycle de Rankine biologique
ODP	Potentiel d'épilation à l'ozone
PCM	Matériau à changement de phase
PHES	Stockage de l'énergie hydroélectrique par pompage
PHS	Stockage de la chaleur par pompage
TES	Stockage d'énergie thermique
VCHP	Pompe à chaleur à compression de vapeur

Résumé

L'énergie est aujourd'hui un facteur essentiel du développement de la société. Cependant, les sources d'énergie fossiles restent la principale source de satisfaction de la demande croissante d'énergie. Sachant cela, ces sources d'énergie entraînent d'importants problèmes de pollution environnementale. C'est pour cette raison que le monde doit s'orienter vers les énergies renouvelables. D'un autre côté, le stockage de l'énergie constitue un problème majeur pour l'évolution de la production d'énergie renouvelable. Comme solutions, les systèmes de batteries Carnot sont une nouvelle méthode de stockage d'énergie à grande échelle, qui stocke l'électricité sous forme de chaleur dans un réservoir thermique à l'aide d'une pompe à chaleur et récupère cette chaleur à l'aide d'un moteur thermique. Un modèle numérique de batterie Carnot (BC) basse température basée sur le cycle organique de Rankine a été simulé par le logiciel MATLAB. Des modèles énergétiques, exergétiques et économiques (3E) du système à BC ont été construits. Le coût actualisé de stockage (LCOS) est utilisé comme fonction objective et la température de stockage thermique comme paramètre d'optimisation. Avec une température de stockage thermique augmentant de 90° C à 130° C, la valeur du coût actualisé du stockage diminue progressivement de 0,236 FCFA/kWh à 0,163 FCFA/kWh. Le rendement puissance-puissance diminue continuellement avec l'augmentation de la température de stockage thermique, cependant, la variation de l'efficacité exergétique avec la température de stockage thermique est décroissante. Une valeur maximale de 26 % est atteinte lorsque la température de stockage thermique est de 90° C. En outre, on peut constater que la valeur du coût actualisé du stockage augmente progressivement avec l'amélioration de l'efficacité énergétique. Le coût et la destruction exergétique de chaque composant sont également évalués.

Mots clés : Batterie à Carnot ; Energie thermoélectrique ; Exergie ; Economie.

Abstract

Energy is today an essential factor in the development of society. However, fossil energy sources remain the main source of meeting the growing demand for energy. Knowing this, these energy sources cause significant environmental pollution problems. This is why the world must move towards renewable energies. On the other hand, energy storage constitutes a major problem for the evolution of renewable energy production. As solutions, Carnot battery systems are a new method of large-scale energy storage, which stores electricity as heat in a thermal reservoir using a heat pump and recovers this heat using using a heat engine. A low-temperature Carnot battery (BC) numerical model based on the organic Rankine cycle was simulated by MATLAB software. Energy, exergy and economic (3E) models of the BC system were built. The levelized cost of storage (LCOS) is used as the objective function and the thermal storage temperature as the optimization parameter. With a thermal storage temperature increasing from 90° C to 130° C, the value of the levelized cost of storage gradually decreases from 0.236 FCFA/kWh to 0.163 FCFA/kWh. The power-to-power efficiency continuously decreases with increasing thermal storage temperature, however, the variation of exergy efficiency with thermal storage temperature is decreasing. A maximum value of 26% is reached when the thermal storage temperature is 90° C. Furthermore, it can be seen that the value of the levelized cost of storage gradually increases with the improvement of energy efficiency. The cost and exergy destruction of each component are also evaluated.

Keywords : Carnot Battery; Thermoelectric energy; Exergy; Economy.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nombreux pays ont fixé des objectifs nationaux pour développer la production d'énergie renouvelable pour diverses raisons telles que le rapport du GIEC [1,2]. Étant donné que l'énergie solaire connue pour être fluctuante et donc souvent produite en dehors des périodes de demande, la production doit être découplée de la demande en termes de temps. L'électrification de tous les secteurs et le recours au stockage de l'électricité sont des éléments de base importants pour atteindre les objectifs fixés et promouvoir une transition énergétique. Le stockage de l'énergie constitue le principal obstacle au développement de la production d'énergies renouvelables. La technologie dominante de stockage d'énergie (hydroélectricité à stockage par pompage) a une bonne efficacité mais elle présente encore de nombreux inconvénients tels que le coût d'investissement initial élevé, le potentiel spécifique au site et l'empreinte environnementale négative. Les centrales de stockage d'énergie hydroélectrique par pompage sont les systèmes de stockage d'électricité les plus largement utilisés. Ils sont bon marché et efficaces [3]. Cependant, ils sont limités par les conditions géographiques. Le stockage par batteries chimiques pour la stabilisation du réseau connaît une croissance forte et continue depuis des années. Ils sont actuellement privilégiés, notamment en raison de leur forte densité énergétique, de leur bon rendement et enfin, parce qu'ils ne subissent aucune contrainte géographique. Cependant, ils ont des coûts spécifiques plus élevés que les autres technologies de stockage. Les batteries Carnot (BC) sont de nouveaux dispositifs de stockage d'électricité et ont gagné en popularité ces dernières années. Contrairement au stockage d'énergie hydraulique par pompage et au stockage par batteries chimiques, les BC ne sont pas encore matures. Suffisants pour le marché, mais ils peuvent constituer une alternative rentable [4]. Les unités de stockage d'énergie thermique peuvent apporter une contribution importante grâce aux matériaux de stockage à faible coût. De plus, très peu d'étude thermo-économique sont présentées dans la littérature. Et le paramètre exergetique essentiel pour l'optimisation des systèmes est très souvent négligé. Cette étude vise à combler tous ses limites.

L'objectif de ce travail est d'effectuer une analyse thermo-économique d'un système de stockage de Carnot. De manière spécifique, il s'agira de faire :

- Classer les différents types de systèmes de stockage thermique et de batteries Carnot et déterminer leurs enjeux en réalisant un état de l'art très détaillé ;

-
- D'effectuer une simulation du système et d'en déduire ses performances énergétiques et exergétique ;
 - De réaliser une analyse économique du système.

Pour réaliser ce travail, nous allons subdiviser cette étude en trois grands chapitres donc le premier sera intitulé ''revue de la littérature'' qui met en exergue la généralité sur les systèmes de stockage, notamment les cycles thermodynamiques utilisés, puis une spécificité sur le stockage à Batterie Carnot. Le deuxième chapitre intitulé ''matériels et méthodes'' met en exergue la modélisation mathématique. Le modèle économique et numérique est présenté. Les composants constituant le stockage à Batterie Carnot y sont détaillés. Au dernier chapitre intitulé ''résultats et discussion'', les résultats de simulation sont présentés. Notamment, l'analyse des performances énergétiques, exergétiques et économiques.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

Introduction

Pour une bonne gestion et une conservation fiable de l'énergie, elle a besoin des méthodes efficaces. Cette section vise à présenter un aperçu des technologies existantes de stockage d'énergie thermique et électrique en se penchant sur le stockage de batterie Carnot. Notamment, les différents types de cycles thermodynamiques sont illustrés. Les avantages et inconvénients de chaque technologie de stockage sont présentés et un justificatif sur le choix utilisé est présenté.

I.1. Généralités sur les cycles thermodynamiques

Les cycles thermodynamiques sont des processus qui décrivent les transformations d'un fluide de travail (gaz, liquide ou vapeur) à travers différents états de température et de pression. Ils sont utilisés pour étudier et analyser les systèmes thermodynamiques tels que les moteurs, les réfrigérateurs, les turbines, les pompes à chaleur et bien d'autres. On distingue deux types de cycles thermodynamiques : les cycles réversibles et irréversibles [1].

Un cycle thermodynamique réversible est un processus théorique idéalisé dans lequel toutes les étapes peuvent être inversées sans aucune perte d'énergie. En pratique, la plupart des cycles sont irréversibles, ce qui signifie qu'il y a des pertes d'énergie sous forme de chaleur ou de frottements. Les cycles irréversibles sont moins efficaces que les cycles réversibles [2].

On distingue à la base le premier et le deuxième principe de la thermodynamique. Le premier principe de la thermodynamique, également connu sous le nom de principe de conservation de l'énergie, énonce que l'énergie totale d'un système isolé reste constante. Le deuxième principe de la thermodynamique concerne la direction des transferts d'énergie et établit que l'entropie

(mesure du désordre) d'un système isolé ne peut pas diminuer au cours d'un processus irréversible [3].

En plus du cycle de Carnot, il existe plusieurs autres cycles thermodynamiques couramment utilisés dans diverses applications. Voici quelques exemples :

I.1.1. Cycle de Rankine

Transformer la chaleur en travail à l'aide d'un échangeur de chaleur. C'est la base de la conception des machines à vapeur de tout type c'est un cycle thermodynamique composé de deux transformations isentropiques et de deux isobares.

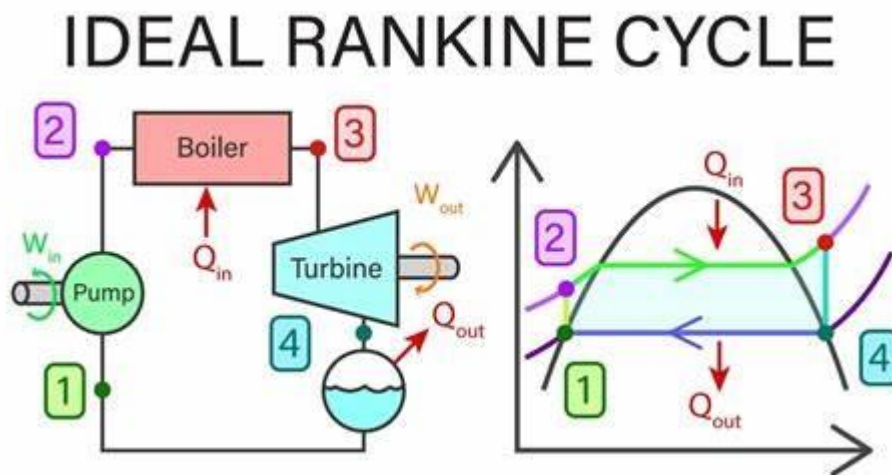


FIGURE I.1: ILLUSTRATION DU CYCLE DE RANKINE [4]

On distingue :

- Cycle de Rankine ouvert, avec rejet de vapeur d'eau dans l'atmosphère. C'est le cas des anciennes locomotives à vapeur qui avaient besoin de transporter des kg d'eau ainsi que du charbon.
- Cycle de Rankine fermé, comme dans le cas des centrales thermoélectriques. Dans les cycles fermés, la chaleur résiduelle de la condensation de la vapeur peut être utilisée par cogénération.

Il s'agit d'un cycle utilisé dans les centrales électriques à vapeur pour produire de l'électricité. Le cycle de Rankine utilise un fluide de travail (généralement de l'eau) qui est chauffé dans une chaudière pour produire de la vapeur, puis cette vapeur est utilisée pour faire tourner une turbine, qui entraîne un générateur électrique. La vapeur est ensuite refroidie et condensée dans un condenseur avant d'être renvoyée à la chaudière. Comme avantages du cycle de Rankine :

- Efficacité élevée : Le cycle de Rankine permet d'atteindre des rendements élevés, ce qui signifie qu'il peut convertir une grande partie de l'énergie thermique en énergie mécanique puis en électricité. Cela le rend efficace sur le plan énergétique ;
- Flexibilité des combustibles : Le cycle de Rankine peut fonctionner avec différents types de combustibles, tels que le charbon, le gaz naturel, le pétrole, la biomasse, etc. Cela permet une certaine flexibilité en termes de choix des sources d'énergie.
- Utilisation de la chaleur résiduelle : Le cycle de Rankine peut également utiliser la chaleur résiduelle provenant d'autres processus industriels pour générer de l'électricité. Cela permet de récupérer une partie de l'énergie qui serait normalement perdue.

Et comme inconvénients du cycle de Rankine :

- Pollution : Le cycle de Rankine est souvent utilisé avec des combustibles fossiles, tels que le charbon et le pétrole, qui produisent des émissions de gaz à effet de serre et contribuent au réchauffement climatique. Cela en fait une source de pollution environnementale ;
- Consommation d'eau : Le cycle de Rankine nécessite une quantité importante d'eau pour le refroidissement et la condensation de la vapeur. Cela peut poser des problèmes dans les régions où l'eau est rare ou précieuse ;
- Temps de démarrage et d'arrêt : Les centrales électriques utilisant le cycle de Rankine peuvent nécessiter un certain temps pour démarrer et arrêter complètement la production d'électricité. Cela peut rendre difficile l'ajustement rapide de la production en fonction de la demande.
- Coûts de maintenance : Les centrales électriques à vapeur utilisant le cycle de Rankine nécessitent des équipements complexes tels que des chaudières, des turbines à vapeur, des condenseurs, etc. Ces équipements peuvent nécessiter une maintenance régulière et coûteuse.

Il convient de noter que certaines de ces limitations peuvent être atténuées par l'utilisation de technologies plus avancées, telles que la capture et le stockage du carbone pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation de systèmes de refroidissement à circuit fermé pour réduire la consommation d'eau, et l'amélioration de l'efficacité globale du cycle [5].

I.1.2. Cycle de Brayton

Également connu sous le nom de cycle à gaz, le cycle de Brayton est utilisé dans les turbines à gaz pour produire de l'énergie mécanique. Le cycle de Brayton utilise un gaz de travail (comme de l'air) qui est comprimé dans un compresseur, chauffé dans une chambre de combustion à l'aide d'un combustible, puis expulsé à travers une turbine pour produire un mouvement rotatif.

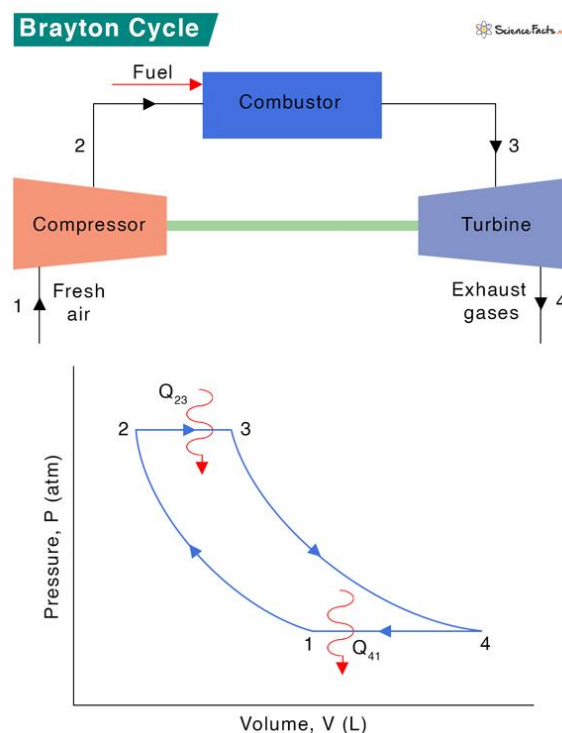


FIGURE I.2 ILLUSTRATION DU CYCLE DE BRAYTON [9]

L'énergie mécanique peut ensuite être utilisée pour générer de l'électricité ou pour d'autres applications. Comme avantages du cycle de Brayton :

-
- Efficacité élevée : Le cycle de Brayton offre généralement une efficacité élevée par rapport à d'autres cycles thermodynamiques. Il permet de convertir une grande partie de l'énergie thermique en énergie mécanique utile [6].
 - Puissance spécifique élevée : Le cycle de Brayton permet d'obtenir une puissance spécifique (puissance produite par unité de poids ou de volume) élevée par rapport à d'autres cycles. Cela en fait un choix attrayant pour les applications nécessitant une puissance élevée dans un encombrement réduit [7].
 - Flexibilité de carburant : Le cycle de Brayton peut fonctionner avec une variété de combustibles, y compris le gaz naturel, le kérosène, le diesel et même l'hydrogène. Cela le rend polyvalent et adapté à différentes sources d'énergie [8].
 - Réponse rapide : Le cycle de Brayton permet une réponse rapide aux changements de charge. Il peut être rapidement démarré et arrêté, ce qui est important dans les applications où une réponse rapide est requise, comme les moteurs à réaction pour les avions. Et comme inconvénients du cycle de Brayton on peut citer :
 - Température élevée des gaz d'échappement : Le cycle de Brayton génère des gaz d'échappement à des températures élevées, ce qui peut poser des problèmes de dissipation de chaleur. La gestion de la chaleur résiduelle peut être complexe et nécessiter des systèmes de refroidissement sophistiqués.
 - Faible rendement à charge partielle : Le cycle de Brayton peut avoir un rendement relativement faible à faible charge ou à charge partielle. Cela signifie qu'il peut être moins efficace lorsqu'il fonctionne en dehors de sa plage de fonctionnement optimale.
 - Coût élevé : Les turbines à gaz et les moteurs à réaction basés sur le cycle de Brayton peuvent être coûteux à produire et à entretenir. Les composants nécessaires, tels que les turbines et les compresseurs, sont complexes et nécessitent une fabrication et une maintenance spécialisées.
 - Impact environnemental : Comme les turbines à gaz fonctionnant sur le cycle de Brayton brûlent des combustibles fossiles, elles émettent des gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone. Cela contribue au changement climatique et nécessite des mesures pour réduire l'impact environnemental, comme l'utilisation de combustibles plus propres ou la capture et le stockage du dioxyde de carbone.

I.1.3. Cycle Otto

Le cycle Otto est utilisé dans les moteurs à combustion interne à essence. Il comprend quatre étapes : l'admission d'un mélange air-carburant, la compression du mélange, la combustion du mélange dans le cylindre et l'échappement des gaz brûlés. Le cycle Otto est le principe de fonctionnement des moteurs à essence utilisés dans la plupart des voitures et des motos [8].

Comme avantage :

- Efficacité thermique élevée : Le cycle d'Otto est conçu pour maximiser l'efficacité du moteur en utilisant une combustion complète du carburant. Cela permet d'obtenir une meilleure efficacité thermique par rapport à d'autres cycles.

DIESEL CYCLE, OTTO CYCLE & DUAL CYCLE

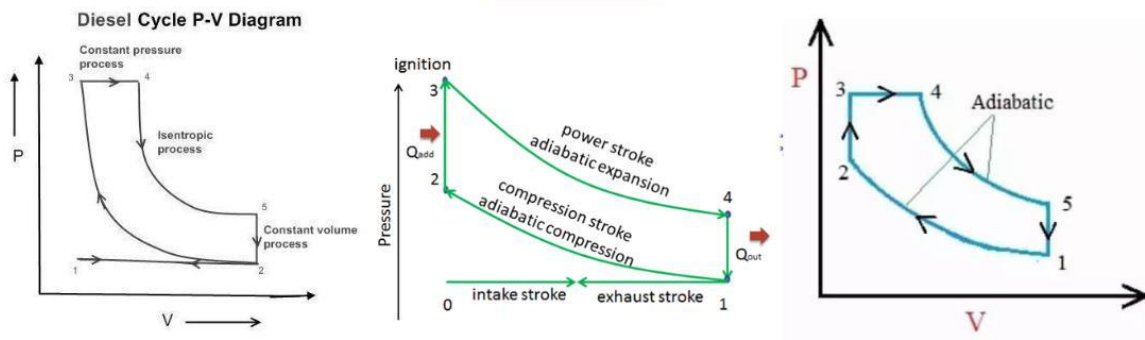


FIGURE I.3. ILLUSTRATION DES CYCLES OTTO ET DIESEL [9]

- Puissance spécifique élevée : Le cycle d'Otto permet d'obtenir une puissance spécifique élevée, c'est-à-dire une puissance élevée par unité de masse du moteur. Cela en fait un choix populaire pour les applications nécessitant une puissance élevée, comme les voitures de sport.
- Faibles émissions de CO₂ : Comparé à certains autres cycles, le cycle d'Otto peut être optimisé pour réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Cela est rendu

possible grâce à des technologies telles que l'injection directe de carburant, la suralimentation et la combustion stratifiée.

Et comme inconvénients :

- Faible rendement à basse charge : Le cycle d'Otto a tendance à avoir un rendement relativement faible à basse charge, car le rapport air-carburant doit être maintenu dans une plage étroite pour assurer une combustion efficace. Cela peut conduire à une consommation de carburant plus élevée dans les conditions de conduite urbaine où la charge du moteur est souvent faible [10].
- Sensibilité à l'auto-allumage : Le cycle d'Otto est sensible à l'auto-allumage du carburant, ce qui peut entraîner des problèmes de cliquetis. Le cliquetis se produit lorsque le mélange air-carburant s'enflamme spontanément avant l'étincelle de la bougie d'allumage, ce qui peut endommager le moteur s'il n'est pas contrôlé [11].
- Utilisation limitée des carburants alternatifs : Le cycle d'Otto est principalement conçu pour fonctionner avec des carburants à base d'hydrocarbures, tels que l'essence. Il peut y avoir des limitations pour utiliser des carburants alternatifs, tels que l'éthanol ou le gaz naturel, car ils peuvent nécessiter des ajustements supplémentaires pour optimiser le fonctionnement du moteur [12].

I.1.4. Cycle Diesel

Le cycle Diesel est utilisé dans les moteurs à combustion interne diesel. Il est similaire au cycle Otto, mais diffère dans le processus de combustion. Dans le cycle Diesel, l'air est comprimé dans le cylindre du moteur, puis le carburant diesel est injecté et s'enflamme spontanément par la chaleur de la compression. La combustion du carburant pousse le piston et génère une puissance. Comme avantages du moteur diesel [13] :

- Efficacité énergétique : Les moteurs diesel ont un rendement énergétique supérieur à celui des moteurs à essence. Ils convertissent une plus grande partie de l'énergie du carburant en énergie mécanique, ce qui se traduit par une consommation de carburant réduite par kilomètre parcouru [14].

-
- Couple élevé : Les moteurs diesel produisent un couple élevé, ce qui signifie qu'ils ont une bonne capacité de traction à bas régime. Cela en fait des choix populaires pour les véhicules utilitaires, les camions et les véhicules de remorquage [15].
 - Durabilité : Les moteurs diesel sont généralement plus robustes et durables que les moteurs à essence en raison de leur construction plus solide. Ils sont conçus pour fonctionner à des températures et des pressions plus élevées, ce qui les rend plus résistants aux contraintes mécaniques [16].

Et comme inconvénients du moteur diesel :

- Émissions polluants SET : Les moteurs diesel émettent une plus grande quantité de particules fines et d'oxydes d'azote (NOx) par rapport aux moteurs à essence. Ces émissions peuvent contribuer à la pollution de l'air et à des problèmes de santé, bien que les réglementations environnementales aient conduit à des améliorations significatives dans ce domaine au fil des années [17].
- Coût initial plus élevé : Les moteurs diesel et les véhicules équipés de moteurs diesel ont tendance à être plus coûteux à l'achat que leurs équivalents à essence. Cela est dû en partie à la complexité de leur conception et à l'utilisation de matériaux plus robustes SET.

Ce ne sont là que quelques exemples parmi de nombreux cycles thermodynamiques utilisés dans différents SET applications. Chacun de ces cycles a ses propres caractéristiques et avantages, adaptés à des utilisations spécifiques [18].

Les batteries Carnot offrent une alternative importante aux autres systèmes de stockage de l'électricité grâce à l'utilisation possible de matériaux de stockage à faible coût dans leurs unités de stockage de l'énergie thermique [19].

Les centrales de stockage d'énergie par pompage sont les systèmes de stockage d'électricité les plus utilisés. Elles sont bon marché et efficaces. Cependant, ils sont limités par les conditions géographiques [20].

Contrairement au stockage d'énergie par pompage et au stockage par batterie chimique, les batteries de Carnot ne sont pas encore suffisamment mûres pour le marché, mais elles peuvent constituer une alternative rentable [21].

I.2. Système de stockage d'énergie thermique

Les unités de stockage d'énergie thermique couvrent un large éventail de technologies de stockage et sont utilisées dans divers domaines. En général, ils sont utilisés soit comme tampons pour stocker l'énergie thermique et soulager les générateurs de chaleur, soit comme régénérateurs pour la récupération de chaleur. Ils sont utilisés depuis des décennies dans le secteur du bâtiment et dans des applications industrielles [22]. Un autre domaine d'application est celui des centrales électriques conventionnelles. Ainsi que solaires pour optimiser les temps de fonctionnement. Actuellement, un autre domaine est ajouté dans le cadre des CB. Ils servent de réservoir chaud ou, dans certains disjoncteurs, également de réservoir froid et représentent un élément crucial de cette nouvelle technologie de stockage de l'électricité [23-30].

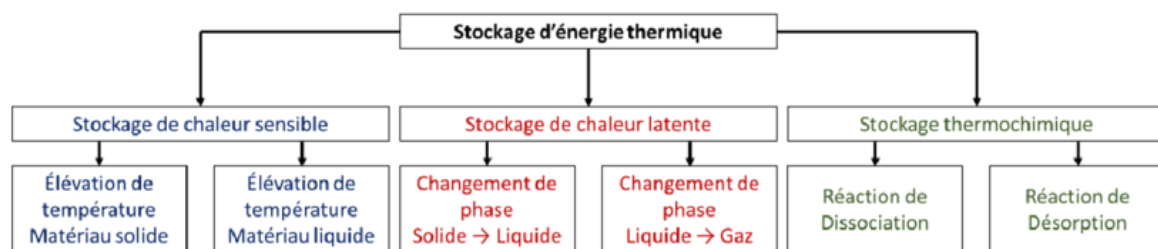


FIGURE I.4. SYSTEME DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE [15]

Les SET étant basés sur différentes méthodes de stockage physique, cette approche est souvent utilisée dans la littérature pour les classer. Comme le montre la **figure I.5**, une distinction est faite entre sensible, latent et thermochimique.

I.2.1. Stockage d'énergie thermique sensible (S-SET)

Ce système de stockage utilise la chaleur latente ou sensible pour stocker l'énergie. Dans le cas du stockage thermique sensible, la chaleur est transférée à un matériau, tel qu'un fluide caloporteur, qui est ensuite stocké dans des réservoirs isolés thermiquement. Lorsque l'énergie thermique est nécessaire, le fluide peut être utilisé pour générer de la vapeur, qui peut ensuite alimenter une turbine pour produire de l'électricité [31]. Le stockage de l'énergie thermique est un élément clé pour permettre une utilisation plus efficace des sources d'énergie renouvelable

et pour répondre aux demandes variables en énergie. Outre le stockage de Carnot, voici quelques autres systèmes de stockage de l'énergie thermique.

I.2.2. Stockage thermochimique

Dans ce système de stockage, l'énergie thermique est utilisée pour conduire des réactions chimiques réversibles qui stockent et libèrent de l'énergie. Les réactions chimiques peuvent avoir lieu dans des matériaux solides, liquides ou gazeux. Par exemple, le stockage thermochimique peut impliquer la décomposition d'un composé chimique lorsqu'il est chauffé et la recombinaison de ses constituants pour libérer de la chaleur lorsque l'énergie est nécessaire [32].

I.2.3. Stockage de l'énergie par chaleur latente

Ce système de stockage utilise les changements d'état d'un matériau pour stocker et libérer de l'énergie thermique. Lorsque le matériau change d'état, comme la solidification ou la fusion, une quantité importante de chaleur latente est absorbée ou libérée. Ce type de stockage peut être utilisé, par exemple, en utilisant la fusion et la solidification de la glace pour stocker et libérer de l'énergie thermique [33].

Ces systèmes de stockage de l'énergie thermique offrent différents avantages et inconvénients en termes d'efficacité, de coût, de densité énergétique et de compatibilité avec les différentes applications. Le choix du système de stockage dépendra des besoins spécifiques et des contraintes de chaque situation [34-41]. En effet, en apercevant le **Tableau 1**, On peut voir que les batteries Carnot ont une capacité de stockage très appréciable avec une efficacité abordable.

TABLEAU I.1. : PARAMETRES CARACTERISTIQUES DE DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ENERGIE [50]

Batterie	PHS	CAES
Carnot		

Efficacité aller-retour (%)	40-70	65-85	50-70
Densité d'énergie (KWh/m ³)	50	1,4	10

I.3. Cas du stockage Carnot

Le stockage d'électricité est un élément clé de la transition vers un système énergétique (100 %) neutre en CO₂ et un moyen de maximiser l'efficacité des réseaux électriques. Les Batteries Carnot offrent une alternative importante aux autres systèmes de stockage d'électricité grâce à l'utilisation possible de matériaux de stockage à faible coût dans leurs unités de stockage d'énergie thermique. Le cycle thermodynamique pertinent pour les systèmes de stockage par batteries est le cycle de Rankine. L'utilisation de matériaux de stockage sensibles à des températures élevées est particulièrement intéressante pour atteindre des densités de stockage plus élevées. Ce cycle thermodynamique de refroidissement suit typiquement le cycle de Rankine, avec une compression du fluide frigorigène, une condensation, une détente et une évaporation.

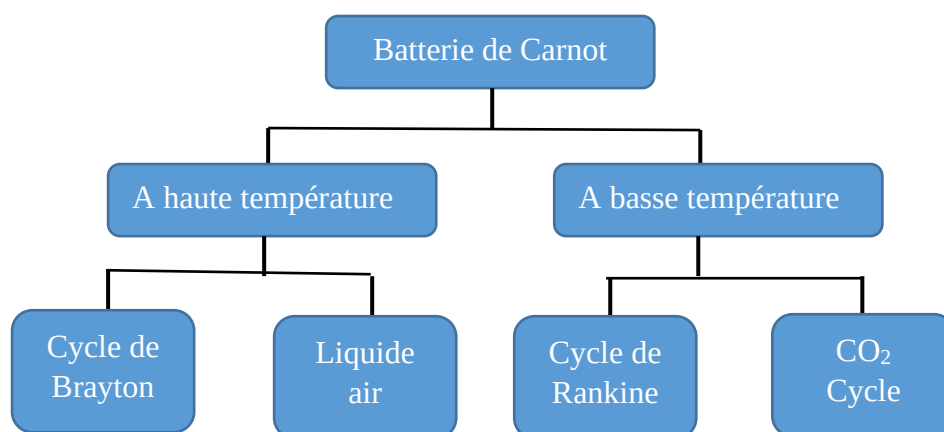


FIGURE I.5. DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE BATTERIE CARNOT

De nombreux projets de recherche sont actuellement menés dans ce domaine et un nombre croissant d'acteurs industriels poussent également le développement de systèmes

jusqu'à la maturité commerciale, ce qui donne naissance à une grande variété de concepts. Ces travaux proposent de nouvelles approches pour la classification des batteries Carnot et des systèmes de stockage d'énergie thermique [41-45].

I.3.1. Principe du stockage de Carnot

Le système de stockage de Carnot, également connu sous le nom de stockage thermique réversible, est basé sur le principe du cycle de Carnot réversible. Le cycle de Carnot est un cycle théorique idéalisé qui décrit le fonctionnement d'une machine thermique la plus efficace possible entre deux réservoirs thermiques à des températures différentes.

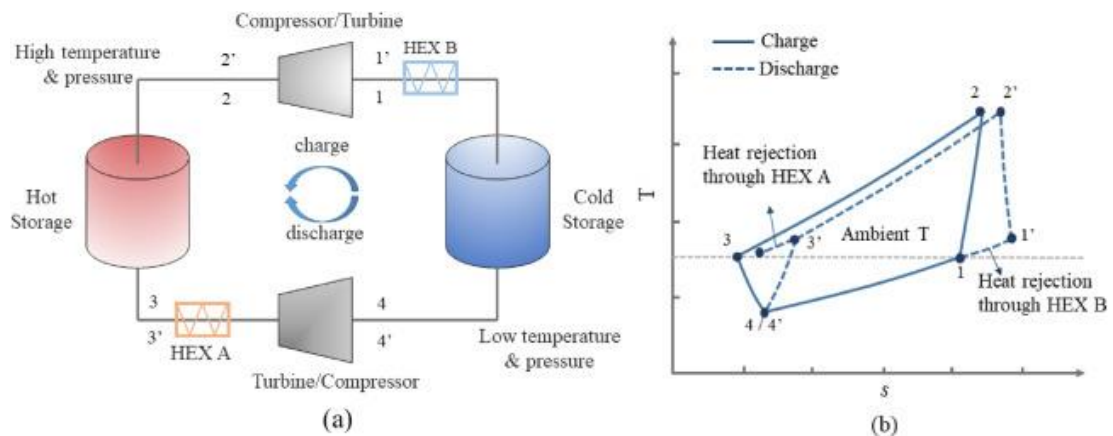


FIGURE I. 6. PRINCIPE DE BASE DU STOCKAGE DE CARNOT [46]

Le principe de base du stockage de Carnot est d'utiliser la chaleur comme moyen de stockage d'énergie. Voici comment le processus fonctionne [47] :

- Étape de charge (stockage) : Pendant cette étape, la chaleur est transférée d'une source chaude à un réservoir de stockage thermique. La chaleur est absorbée par un fluide de travail, généralement un gaz, qui se trouve à une température relativement basse. Le fluide de travail est comprimé, ce qui augmente sa température et sa pression, et stocke ainsi l'énergie thermique ;

- Stockage : Une fois que le fluide de travail est comprimé, la chaleur stockée est conservée dans le réservoir thermique isolé, où elle est maintenue jusqu'à ce que l'énergie thermique soit nécessaire ;
- Étape de décharge (récupération) : Lorsque l'énergie thermique est requise, le fluide de travail est détendu, ce qui fait baisser sa température et sa pression. En conséquence, la chaleur stockée est libérée et peut être utilisée pour effectuer un travail, par exemple, en faisant tourner une turbine pour produire de l'électricité.

Le stockage de Carnot est basé sur le principe de réversibilité, ce qui signifie que le processus de stockage et de récupération peut être inversé sans perte d'énergie. Dans l'ensemble, la plage de température est très importante pour choisir le support de stockage. Par exemple, l'eau est le support de stockage le moins cher a une plage de température de 120 à 150 °C, l'huile thermique est comprise entre 200 et 300°C et PCM peuvent atteindre 700-800°C [18].

I.3.2. Quelques travaux récents

Plusieurs examens des systèmes généraux de stockage d'énergie [10],[11] sont disponibles, fournissant un aperçu des technologies de stockage d'énergie. Les auteurs de la Ref. [14] ont donné une revue de certains SET dans la conception de lits garnis. Les auteurs ref. [38] ont développés cinq variantes de procédé (pour la cogénération) sont décrites, dans lesquelles le fluide HTF circule à travers le SET sans pression (atmosphérique) et est partiellement utilisé dans le procédé de turbine à gaz couplée. À cette fin, l'air peut être choisi comme fluide de travail de la turbine à gaz ainsi que le HTF dans le SET, ce qui rend les fuites possibles dans le système de l'installation non critiques. Les composants du procédé de turbine à gaz sont relativement peu coûteux, ce qui favorise la viabilité économique du CB. De plus, il existe des procédés encore en développement, comme le procédé liquide-air [20,47] et la cellule photovoltaïque multifonctions, également connue sous le nom de photovoltaïque thermique (TPV) [36].

Les SET de conception à lit garni (PB) peuvent être remplis avec une large gamme de matériaux. Une exigence importante est une résilience suffisante à la dégradation liée au cycle [78]. Par conséquent, des matériaux peu coûteux, car disponibles localement, tels que les roches volcaniques [29], le sable ou les remblais de roches fines [41, 42], ou encore les déchets tels

que les granulés de scories métalliques provenant de la production d'acier [30] peuvent être utilisés. La littérature contient également des études avec des remplissages constitués de granulés d'oxyde d'aluminium. Les auteurs de la ref. [38] ont présenté une possibilité de contourner ce problème. Dans ce cas, des capteurs de température ont été installés dans des grains individuels du lit. Cependant, cela nécessite une granulométrie suffisamment grande du matériau de stockage pour pouvoir localiser la pointe de mesure à l'intérieur de celui-ci. Les systèmes de stockage non en vrac se caractérisent par une structure interne fixe qui contient des canaux d'écoulement façonnés. Pour cette raison, ils sont également appelés ici SET à structure fixe (FS). En raison de leur mise en forme complexe mais nécessaire, ils sont généralement associés à des coûts d'investissement plus élevés que les systèmes de stockage à lit garni. En retour, la mise en forme apporte de la flexibilité sous la forme d'une conception libre de la géométrie du noyau tout au long de son processus de fabrication. Les épaisseurs de paroi et les diamètres hydrauliques des canaux d'écoulement peuvent être influencés par la géométrie. L'utilisation de briques moulées produit SET en série telles que des briques perforées [28,35] ou des briques de maçonnerie communes [7,37], ainsi que des dalles [34], peuvent réduire le coût de mise en forme. Dans le domaine des stockages en béton, les auteurs [29,31] ont présenté des démonstrateurs intégrant des tuyaux coulés pour empêcher le contact du HTF et du matériel de stockage. Il existe aujourd'hui de nombreuses technologies de stockage de l'énergie électrique. Parmi eux, le stockage d'énergie hydroélectrique par pompage (PHES) et le stockage d'énergie par air comprimé (CAES) ont été démontrés dans des applications à grande échelle et ont été déployés commercialement [6]. En revanche, les batteries électrochimiques telles que les batteries Li-ion et Flow sont bien adaptées aux applications à petite et moyenne échelle avec de nombreux exemples récents de déploiements commerciaux [25]. Le PHES est la technologie de stockage d'électricité la plus largement adoptée en raison de son faible coût (5 à 100 \$/kWh), de son rendement élevé et de son niveau de préparation technologique élevé [1], mais elle est limitée par les exigences géographiques. Cette limitation s'applique également au CAES, qui a un rendement relativement élevé (jusqu'à 70 %) avec un faible coût (20 à 200 \$/kWh) [6]. Les batteries à flux présentent une densité énergétique élevée et un taux de charge élevé, mais présentent actuellement des coûts élevés et une faible durée de vie [15]. Par conséquent, il est urgent de trouver des solutions de stockage d'énergie à l'échelle du réseau, peu coûteuses, de longue durée et sans contraintes géographiques.



FIGURE I.7. STATION DE STOCKAGE D'ENERGIE ELECTRIQUE SOUS FORME DE CHALEUR [49]

Des efforts considérables ont donc été déployés pour développer de nouvelles technologies permettant de répondre à ces besoins. Parmi les exemples de développements récents, citons le stockage d'énergie thermique par pompage (PSET) et le stockage d'énergie à air liquide (LAES). Ces technologies offrent des alternatives aux PHES et CAES en raison de leur faible coût, de leur facilité de déploiement et de leur évolutivité sans contraintes géographiques. Les LAES et les PSET peuvent être classées comme batteries Carnot (CB), car elles stockent toutes deux de l'énergie thermique et fonctionnent comme un stockage puissance-puissance. Il y a eu récemment un certain nombre d'études approfondies dans le domaine du stockage d'énergie, telles que [5,6], qui couvrent les performances technico-économiques, les applications et les progrès récents de la recherche sur les technologies stationnaires de stockage d'énergie électrique. D'autres travaux se sont concentrés sur des technologies spécifiques appartenant à CB [7] ont couvert les configurations, les mesures de performance, les applications et les progrès récents du PSET ainsi que d'autres technologies de stockage d'énergie thermomécanique, tandis que [8] a abordé le PSET seul, en se concentrant sur la modélisation et les matériaux du stockage d'énergie thermique. Frate et coll. [9] ont étudié l'intégration

thermique du PSET. Les revues sur LAES ont été présentées par réf. [10,11]. Enfin, CB dans son ensemble a été revu par ref. [12], discutant de différentes configurations de système, d'indicateurs de performance et de prototypes CB existants. Ces articles de synthèse ont souligné l'importance de l'efficacité des composants du processus pour déterminer les performances du système CB (par exemple, les échangeurs de chaleur transcritiques pour le LAES et le PSET, le stockage d'énergie thermique et les turbomachines pour le PSET), mais ils ne discutent jamais des composants eux-mêmes en termes de caractéristiques techniques, limitations et performances. Dans le même temps, plusieurs revues se concentrent sur des composants uniques sans avoir une application spécifique du CB, mais des revues ciblées de machines d'expansion pour CAES [13] et pour le cycle de Rankine [14] ont été présentées.

Conclusion

Cette partie visait à présenter une revue de la littérature sur les systèmes de stockage d'énergie thermique. Une particularité est faite avec le stockage de Carnot. Notamment une généralité sur les cycles thermodynamiques est présentée. Les avantages et inconvénients de chaque type de cycle de stockage a été présenté. Il en ressort que le système de stockage de Carnot est une bonne alternative aux systèmes de stockage d'énergie thermique et qui sont régis par plusieurs équations thermodynamiques. La section suivante présente les équations du système et la résolution numérique.

CHAPITRE II MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE II MATERIEL ET METHODE

Introduction

Le système de stockage de Carnot est principalement conçu pour stocker et récupérer de la chaleur thermique, plutôt que de l'électricité directement. Il utilise la chaleur comme moyen de stockage d'énergie. Pendant l'étape de charge, la chaleur est absorbée et stockée dans un réservoir thermique à l'aide d'un fluide de travail comprimé. Lors de l'étape de décharge, cette chaleur stockée est libérée et peut être utilisée pour effectuer un travail, tel que la production d'électricité en faisant tourner une turbine. Cependant, il est important de noter que le stockage de chaleur thermique peut être utilisé indirectement pour stocker de l'énergie électrique. Ce système est gouverné par plusieurs équations donc ce chapitre présentera.

II.1. Modèle Physique

II.1.1. Diagramme schématique d'une batterie Carnot (BC)

La **Figure II.1** présente le diagramme schématique d'une batterie de Carnot (CB).

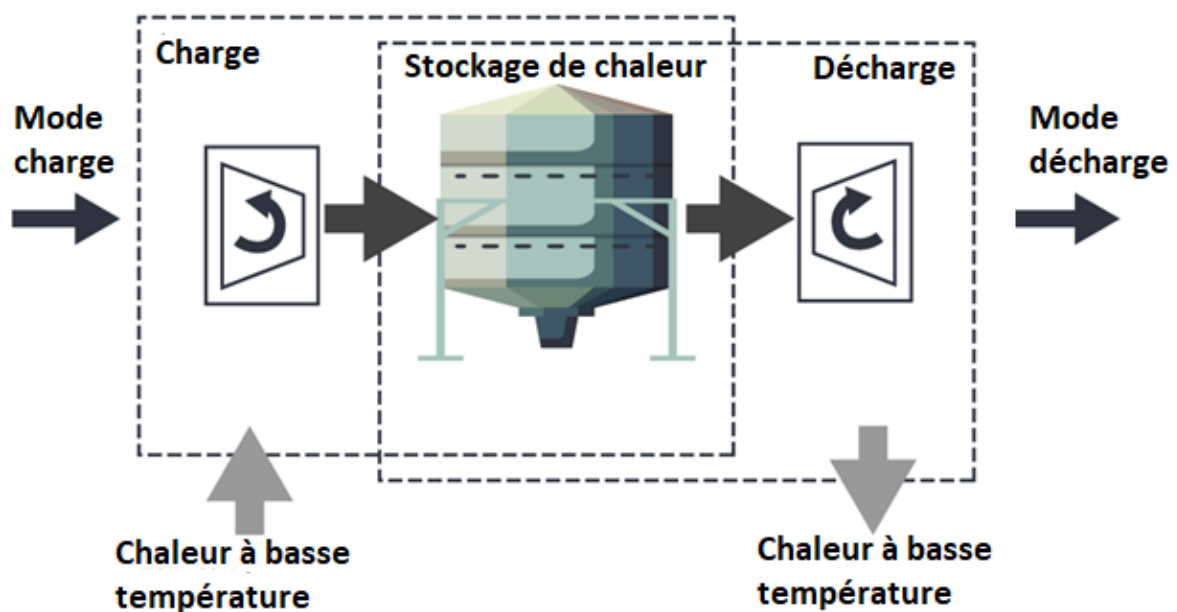


FIGURE II.1. DIAGRAMME SCHEMATIQUE D'UNE BATTERIE CARNOT (BC)

II.1.2. Description du modèle physique

La **Figure II.2** montre le diagramme schématique de la batterie HP-ORC Carnot de base. De même à la **Figure II.3** on observe le diagramme T-s du système de batterie Carnot HP-ORC. La ligne pointillée représente le processus thermique et les points d'état sont cohérents avec ceux indiqués à la **Figure II.1**. Ce système de base comprend trois sous-systèmes, à savoir les sous-systèmes HP, TES et ORC. ORC est un type développé de cycle Rankine à vapeur ; les deux cycles ont le même principe de fonctionnement avec les mêmes composants. Cependant, la différence entre les deux types réside dans le fluide de travail, le cycle Rankine à vapeur utilise de l'eau comme fluide de travail, tandis que le cycle Rankine organique utilise un fluide de travail organique (d'oxygène, de carbone et d'hydrogène) qui a une température d'ébullition inférieure à celle de l'eau [50]. L'utilisation du cycle organique de Rankine comme cycle thermodynamique pour ce système de batterie Carnot à basse température rendrait le processus de stockage d'énergie économiquement réalisable avec une architecture simple.

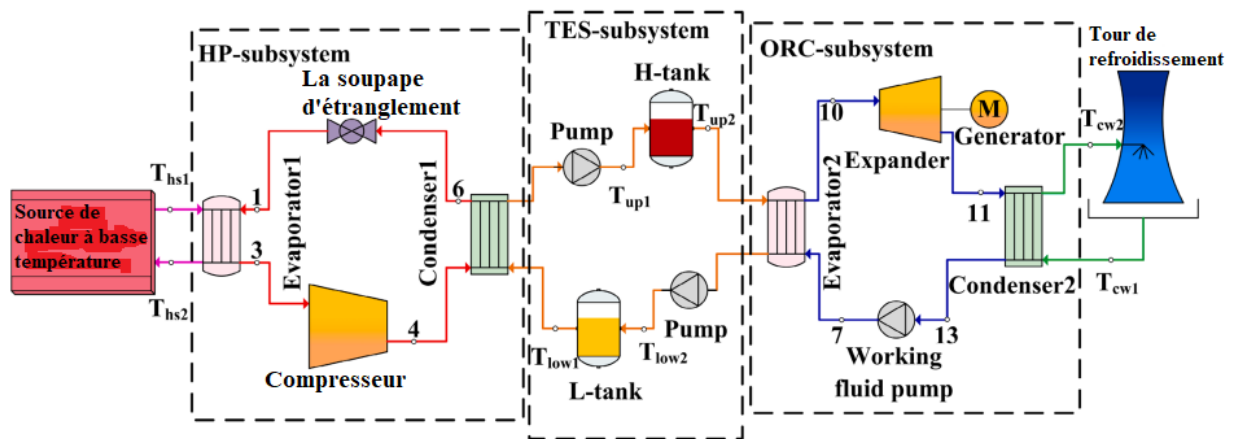


FIGURE II.2. MODELE PHYSIQUE D'UN SYSTEME DE STOCKAGE HP-ORC CARNOT

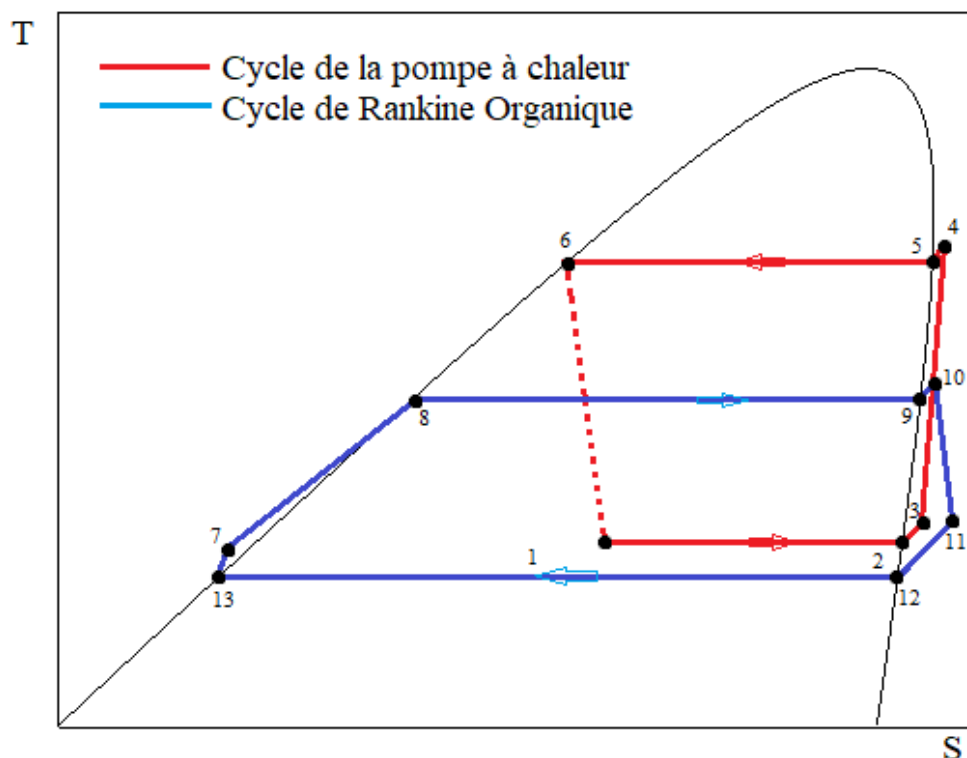


FIGURE II.3. DIAGRAMME T-S DU SYSTEME DE BATTERIE CARNOT HP-ORC

Le premier sous-système comprend principalement un évaporateur, un compresseur, un condenseur et un papillon des gaz, où l'énergie thermique de faible qualité peut être évaluée en énergie thermique de niveau supérieur en utilisant l'énergie électrique excédentaire. Le deuxième sous-système est composé de réservoirs hauts et basse température et de deux pompes à eau, qui servent de stockage d'énergie thermique. Le troisième sous-système comprend les composants d'un évaporateur, d'un détendeur, d'un condenseur et d'une pompe à fluide de travail, où l'énergie thermique est transformée en énergie électrique.

Ce système présenté comprend deux modes de fonctionnement. En mode de charge, le fluide de travail absorbe l'énergie thermique de faible qualité provenant d'une source de chaleur à basse température et s'évapore jusqu'à un état surchauffé dans l'évaporateur 1 (1→3). Le fluide de travail (gazeux à basse température et pression) est ensuite comprimé dans le compresseur

(3→4). Après cela, le fluide de travail libère une chaleur de niveau supérieur vers le fluide caloporteur (l'eau dans cette étude) dans le condenseur (4→6), tandis que l'énergie thermique de niveau supérieur est stockée. Enfin, le fluide de travail (liquide saturé à haute température et pression) devient un mélange gaz-liquide à basse température et pression dans le papillon des gaz (6→1) et se jette ensuite dans l'évaporateur 1. En mode de décharge, le fluide de travail absorbe l'énergie thermique de niveau supérieur et s'évapore jusqu'à un état surchauffé dans l'évaporateur 2 (7→10). Ensuite, elle (la vapeur à haute pression) s'écoule dans le détendeur pour produire un travail mécanique, qui entraîne le générateur à produire de l'électricité (10→11). Le fluide de travail basse pression entre dans le condenseur 2, où le fluide de travail est refroidi par l'eau de refroidissement (11→ 13). Enfin, il est mis sous pression par la pompe à fluide de travail (13→ 7) et retourne à l'évaporateur 2. Et terminez tout le processus de décharge.

II.2. Bilan énergétique sur le système

Une analyse énergétique fournit une évaluation « quantitative » d'un système de transfert d'énergie. Pour un système de batterie Carnot HP-ORC, HP transfère d'abord l'électricité en énergie thermique par cycle en mode de charge, puis ORC transfère une partie de l'énergie thermique en électricité en mode de décharge.

En raison de la complexité de ces équations mathématiques, les différentes hypothèses suivantes sont formulées pour simplifier la résolution :

- Chaque composant du système fonctionne de manière stable ;
- Les chutes de pression dans les échangeurs de chaleur et les canalisations sont négligeables ;
- La pompe à fluide de travail est adiabatique avec une efficacité constante ;

II.2.1. Mode recharge

La **Figure 2** montre les processus thermodynamiques correspondants de ce système présenté en mode de charge. Ce système présenté en mode de charge comprend quatre processus thermodynamiques de base, qui sont décrits comme suit :

- Processus d'évaporation (1→3) : Le fluide de travail absorbe la chaleur l'énergie provenant de la source de chaleur. Taux de transfert de chaleur Q_{eva} comprend deux parties Equation (2.1) et (2.2):

$$Q_{eva} = m_{hp}(h_3 - h_1) = m_{hp}(q_{12} + q_{23}) = m_{hs}C_p(T_{hs1} - T_{hs2}) \quad (2.1)$$

$$q_{23} = \int_{T_2}^{T_3} C_p dT \quad (2.2)$$

Où h_i est l'enthalpie du point d'état i . q_{mn} désigne la chaleur absorbée ou dégagée par unité de fluide de travail à partir du point m au point n . m_{hs} et m_{hp} sont respectivement le débit massique de fluide caloporteur dans la source de chaleur et le fluide de travail dans le cycle HP Cycle. C_p est la capacité thermique spécifique à pression constante.

- Processus de compression (3→4) : Le fluide de travail est comprimé en vapeur à haute température et sous pression. Dans ce processus, la consommation d'énergie W_{com} dans le compresseur est exprimée par l'équation (2.3).

$$W_{com} = m_{hp}(h_4 - h_3) = m_{hp} \frac{(h_4 - h_3)}{\eta_{com}} \quad (2.3)$$

Où η_{com} est l'efficacité isentropique du compresseur et $i+1s$ représente l'entropie du point d'état $i+1$ égal au point d'état i .

L'entropie au point d'état $i+1s$ peut être obtenue par l'équation (2.4) :

$$s_{i+1s} - s_i = s_{i+1s}^d + \Delta s^0 - s_i^d \quad (2.4)$$

$$\Delta s^0 = \int_{T_i}^{T_{i+1s}} \frac{C_p^0}{T} dT - R \ln\left(\frac{P_{i+1s}}{P_i}\right) \quad (2.5)$$

$$s^d = (s^d)^0 + w \left[\frac{(s^d)^1 - (s^d)^0}{0.3978} \right] \quad (2.6)$$

Avec Δs^0 où représente la différence d'entropie d'un gaz parfait. s^d est l'entropie de l'écart du gaz réel par rapport au gaz parfait, qui peut être calculée selon la méthode Lee-Kesler.

- Stockage d'énergie thermique (4→6) : Le fluide de travail libère de la chaleur tandis que l'eau de stockage absorbe la chaleur dans le condenseur. Le taux de chaleur stockée peut être obtenu par les équations (2.7), (2.8) et (2.9).

$$Q_{sto} = m_{hp} (h_4 - h_6) = m_{hp} (q_{45} + q_{56}) = m_{sto} C_P (T_{up} - T_{low}) \quad (2.7)$$

$$q_{45} = \int_{T_5}^{T_4} C_P dT \quad (2.8)$$

$$q_{56} = \Delta H_v (T_5) \quad (2.9)$$

Où m_{sto} est le débit massique de fluide caloporteur dans le stockage thermique. $\Delta H_v (T_i)$ peut être obtenu selon l'équation (2.9).

- Processus de limitation (6→1) : L'enthalpie du fluide de travail reste inchangée après son passage dans le papillon des gaz, ce qui peut être exprimé comme suit :

$$h_1 = h_6 \quad (2.10)$$

Ainsi, le coefficient de performance COP peut être obtenu comme suit :

$$COP = \frac{Q_{sto}}{W_{com}} \quad (2.11)$$

II.2.2. Mode décharge

Les processus thermodynamiques de ce système présenté en mode décharge sont illustrés dans Figure 3. Il se compose également principalement de quatre processus thermodynamiques, tels que détaillés par les expressions suivantes :

- Processus de libération d'énergie thermique (7→10) : L'évaporateur 2 se caractérise par une entrée sous forme liquide et une sortie sous forme de vapeur surchauffée. En conséquence, l'évaporateur 2 peut être divisé en région de liquide sous-refroidi (7-8), région d'écoulement diphasique (8-9) et région de vapeur surchauffée (9-10). C'est dans le but de négliger les pertes de stockage d'énergie thermique que nous nous intéressons à cette étude. Le taux de transfert de chaleur Q_{sto} dans l'évaporateur 2 peut être calculé comme suit :

$$Q_{sto} = m_{orc}(h_{10} - h_7) = m_{orc}(q_{78} + q_{89} + q_{910}) = m_{sto}C_P(T_{up} - T_{low}) \quad (2.12)$$

$$q_{78} = \int_{T_7}^{T_8} C_P dT \quad (2.13)$$

$$q_{89} = \Delta H_v(T_8) \quad (2.14)$$

$$q_{910} = \int_{T_9}^{T_{10}} C_P dT \quad (2.15)$$

Où m_{orc} est le débit massique du fluide de travail dans le cycle ORC

- Processus d'expansion (10→11) : Le détendeur convertit l'énergie cinétique du fluide de travail en énergie électrique. La puissance générée W_{exp} peut être calculé selon l'équation (16)

$$W_{exp} = m_{orc}(h_{10} - h_{11}) = m_{sto}(h_{10} - h_{11s})\eta_{exp} \quad (2.16)$$

Avec η_{exp} est l'efficacité isentropique de l'expandeur.

- Processus de condensation (11→13) : Le fluide de travail dégage de la chaleur et est refroidi par l'eau de refroidissement. Le taux de transfert de chaleur dans la condensation peut être exprimé comme suit :

$$Q_{con} = m_{orc}(h_{11} - h_{13}) = m_{orc}(q_{1112} + q_{1213}) = m_{cw}C_P(T_{cw2} - T_{cw1}) \quad (2.17)$$

$$q_{1112} = \int_{T_{12}}^{T_{11}} C_P dT \quad (2.18)$$

$$q_{1213} = \Delta H_v(T_{12}) \quad (2.19)$$

Avec m_{cw} est le débit massique de l'eau de refroidissement.

- Processus de pressurisation (13→7) : Le fluide de travail liquide saturé est pressurisé par la pompe à fluide de travail. Sa consommation électrique W_{pump} peut être calculé par l'équation (20) :

$$W_{exp} = m_{orc}(h_7 - h_{13}) = m_{orc} \frac{P_7 - P_{13}}{\rho_{13} \eta_{pump}} \quad (2.20)$$

Où η_{pump} est l'efficacité isentropique de la pompe à fluide de travail. ρ représente la densité du liquide saturé et du fluide de travail.

Ainsi, l'efficacité de la production η_{orc} peut être exprimée comme suit :

$$\eta_{orc} = \frac{W_{net}}{Q_{sto}} \times 100\% = \frac{W_{turb} - W_{pump}}{Q_{sto}} \times 100\% \quad (2.21)$$

Où W_{net} est la puissance nette du cycle ORC.

II.2.3. Evaluation des performances du système puissance-puissance

Le P2P (Puissance-vers-puissance) est un critère d'évaluation important d'un système de stockage d'énergie. Il peut être calculé comme suit :

$$P2P = \eta_{sto} \eta_{orc} COP \quad (2.22)$$

Avec η_{sto} représentant l'efficacité du stockage thermique, fixé 1 car les pertes de stockage thermique sont négligeables du à des matériaux bien spécifique [48].

II.2.4. Evaluation des performances exergetique

L'exergie représente la part de l'énergie d'un système qui peut être convertie en travail mécanique de manière réversible. Pour une batterie Carnot, l'exergie dépend de la différence de température entre la batterie et son environnement. Lors de la charge, l'exergie absorbée est maximale lorsque la batterie est à la température la plus basse de son cycle. Lors de la décharge, l'exergie restituée est minimale lorsque la batterie est à la température la plus élevée de son cycle. Ainsi, l'analyse exergetique permet d'évaluer le potentiel maximal de conversion d'énergie d'un système de stockage par batterie Carnot, en fonction des températures de fonctionnement. Elle provient de la deuxième loi de la thermodynamique qui stipule que l'entropie d'un système augmentera toujours avec le temps. L'entropie qui lui est le taux de désordre dans un système. Celui-ci réagissant avec son environnement. L'efficacité exergetique est donc donné par l'équation (23).

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{orc}}{Ex_{hs} + Ex_{hp}} \quad (2.23)$$

Avec Ex_{ORC} , Ex_{hs} et Ex_{hp} sont respectivement l'exergie du cycle ORC, de la source de chaleur et de la pompe à chaleur. L'exergie du ORC est donné par l'équation (24). L'exergie de la pompe de chaleur lui donné par l'équation (25). Où t est la durée de stockage.

$$Ex_{orc} = \eta_{P2P} Ex_{hp} \quad (2.24)$$

$$Ex_{hp} = \frac{Q_{hs}}{COP - 1} t \quad (2.25)$$

L'exergie de la source de chaleur est donnée à l'équation (26).

$$Ex_{hs} = \dot{m}_{hs} t (h_{hs_max} - h_{hs_min}) - \dot{m}_{hs} T_a t (s_{hs_max} - s_{hs_min}) \quad (2.26)$$

II.3. Modèle économique

La performance économique est l'un des aspects les plus importants pour l'optimisation et l'application du système HP-ORC Carnot Battery. LCOS quantifie le coût actualisé du stockage d'énergie par unité d'électricité déchargée et s'est avéré être un outil approprié pour l'évaluation économique des technologies de stockage d'électricité, en particulier pour la comparaison de différentes technologies de stockage d'électricité [29]. Par conséquent, le LCOS est sélectionné pour évaluer les performances économiques de différents systèmes de batteries HP-ORC Carnot.

$$LCOS = \frac{C_{tot} + \sum_{i=1}^{LT} \frac{C_{an}}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^{LT} \frac{E_{gen}}{(1+r)^i}} t \quad (2.27)$$

II.4. Procédure de résolution numérique

Après le développement du modèle mathématique, les différentes parties sont couplées et la résolution a été numérique pour obtenir les résultats, grâce à la technique de programmation numérique dans Matlab. Dans ce travail, une série de conditions aux limites ont

été définies pour comparer et analyser les performances du système de batteries HP-ORC Carnot. Parmi eux, le débit massique de la source de chaleur et l'efficacité isentropique de la pompe à fluide de travail sont supposés être respectivement de 50 kg/s et 0,8. Les paramètres définis dans le système sont donnés dans **Tableau II.1**.

TABLEAU II.2. DONNEES D'ENTREES

Données	Value
Puissance d'entrée	100 Kw
Cycle de charge basse pression	3,06 bar
Cycle de décharge basse pression	1,01 bar
Température du condenseur ORC	40 °C
Température de l'évaporateur de charge	75 °C
Température terminale au point de pincement	5K
Efficacité du ballon de stockage d'eau chaude	1
Débit massique de la source de chaleur [kg/s]	50
Efficacité isentropique de la pompe à fluide de travail	0,8
Température de l'eau de refroidissement [° C]	20
Durée de stockage [h]	6

Les données des études de cas utilisées à des fins de calcul sont similaires à celles présentées par Staub et al [51].

II.5. Procédure de validation numérique

Les résultats simulés du système HP-ORC proposé ont été comparés aux résultats de [52] pour valider l'exactitude des modèles mathématiques proposés utilisés dans cet article.

Comme représenté sur la Tableau 5, les performances simulées sont en bon accord avec la valeur du ventilateur et l'erreur relative maximale de η_{orc} que n'est que de 6,13 %. Par conséquent, les résultats de la comparaison vérifient la faisabilité et la fiabilité des modèles mathématiques proposés pour le système proposé.

TABLEAU II.2. VALIDATION NUMERIQUE

Paramètres	Valeurs de la littérature [52]	Présente étude	Erreur relative (%)
P_{cycle}(kW)	35.19	34.1	3.09
W_{net}(kW)	80.99	79.43	1.92
W_{turb} (kW)	85.34	86.5	1.35
W_{pump} (kW)	4.36	4.18	4.12
W_{comp}(kW)	146	145.2	0.54
Q_{evap} (kW)	855	854.20	0.09
η_{ORC} (%)	11.73	11.01	6.13

Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de présenter les équations mathématiques régissant le fonctionnement d'un système à Batterie Carnot. Les modèles énergétiques, exergétiques et économiques sont présentés. Une approche de résolution numérique est présentée et la validation numérique expérimentale est analysé. Il en ressort que le modèle présenté se rapproche de la littérature avec un écart de 6,13 %. Ce qui garantie l'exactitude de notre modèle. Le chapitre suivant présente une analyse des résultats de simulation trouvés.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Dans cette section, la faisabilité et la fiabilité du modèle mathématique proposé sont présentés. Les performances thermodynamiques et économiques du système de stockage à Batterie Carnot sont présentées et interprétées. Une analyse approfondie des performances du système à Batterie Carnot est effectuée dans ce chapitre.

III.1. Résultats d'analyse énergétique

La **Figure. III.1** présente la variation de l'énergie générée en fonction de la température de stockage thermique. Nous pouvons voir que lorsque la température de stockage thermique augmente de 90°C à 130°C, l'énergie totale générée augmente de manière significative. Cette tendance s'explique par les principes du cycle de Carnot. Lorsque la température de la source de chaleur (le stockage thermique) augmente, le rendement thermodynamique du cycle de Carnot s'améliore, permettant de générer davantage d'énergie électrique. Ainsi, en augmentant la température du stockage thermique de 90°C à 130°C, on accroît le rendement thermodynamique du cycle, ce qui se traduit par une production d'énergie électrique plus importante. Cette observation met en évidence l'importance d'optimiser la température de stockage thermique afin d'obtenir des performances énergétiques maximales pour ce type de système.

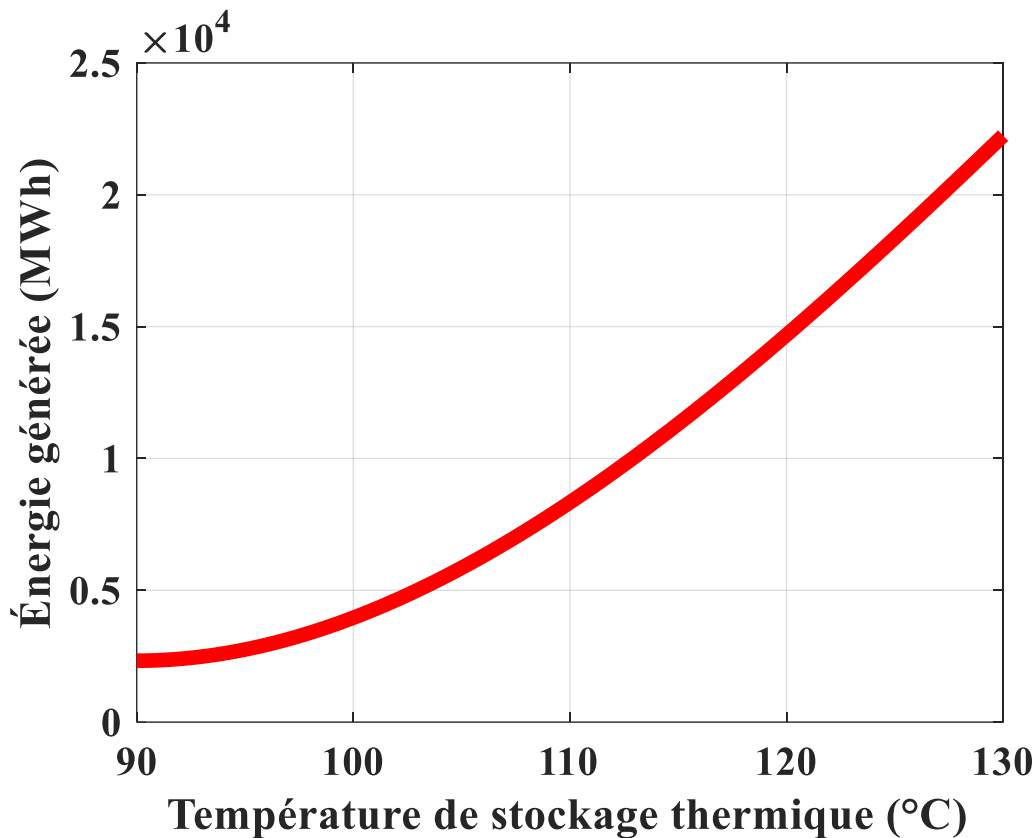


FIGURE III.1. VARIATION DE L'ENERGIE TOTALE GENEREES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE STOCKAGE THERMIQUE

La **Figure III.2** présente la variation de l'efficacité P2P en fonction de la température de stockage thermique. Cette figure montre que lorsque la température de stockage thermique augmente de 90°C à 130°C, l'efficacité P2P (Power-to-Power) du système diminue de manière significative. Ce comportement est surprenant, car on s'attendrait généralement à ce que l'augmentation de la température de la source chaude améliore le rendement thermodynamique du cycle de Carnot, et donc l'efficacité globale du système. Une possible explication pourrait être que d'autres facteurs entrent en jeu et deviennent prédominants par rapport au seul effet du rendement thermodynamique. Par exemple, des pertes supplémentaires liées à la gestion de températures plus élevées (isolation, dissipation, etc.) pourraient contrebalancer les gains de rendement, entraînant ainsi une diminution de l'efficacité P2P. Cette analyse rejoint donc bien les travaux de Ruoxuan et al.[52].

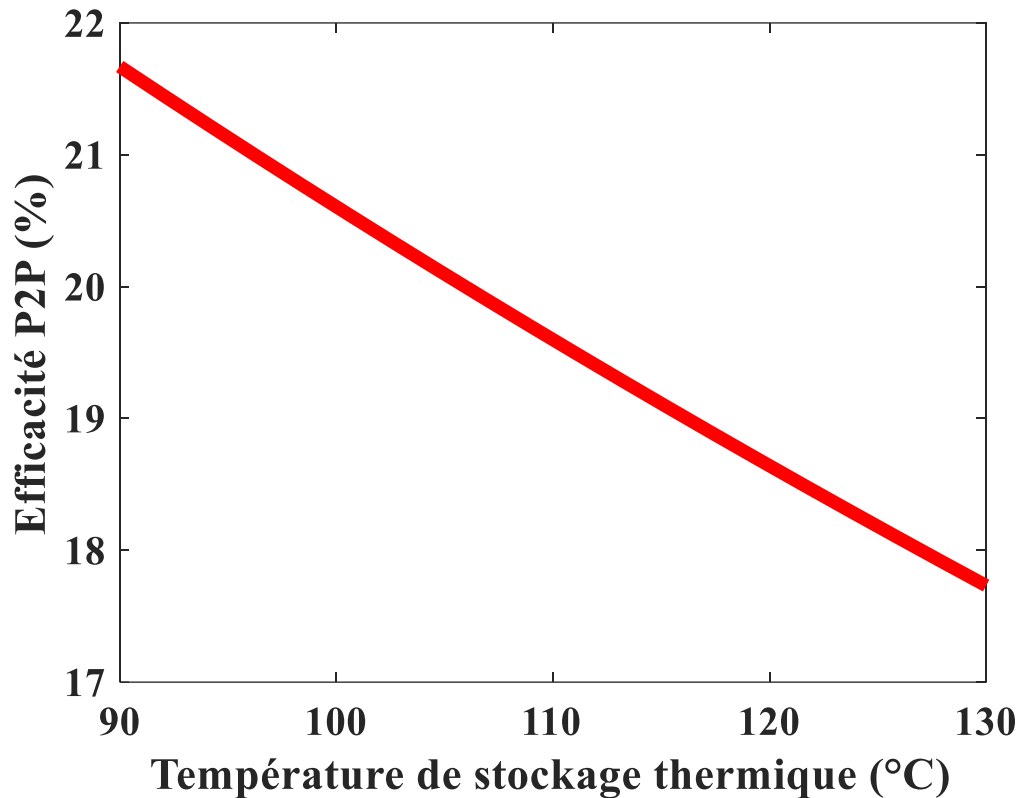


FIGURE III.2. VARIATION DE L'EFFICACITE P2P EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE STOCKAGE THERMIQUE

La **Figure III.3** montre le rendement du cycle en fonction de la température de stockage thermique.

Cette figure montre l'évolution du rendement du cycle thermodynamique en fonction de la température de stockage thermique. Nous pouvons observer que lorsque la température de stockage thermique augmente de 90°C à 130°C, le rendement du cycle augmente de manière significative. Cette tendance est conforme aux principes thermodynamiques du cycle de Carnot, où une élévation de la température de la source chaude (stockage thermique) se traduit par une amélioration du rendement. Plus la différence de température entre la source chaude et la source froide est importante, meilleur sera le rendement thermodynamique du cycle. Contrairement à ce que nous avons observé précédemment sur la figure III.2, où l'efficacité P2P diminuait avec la température, cette figure III.3 montre que le rendement du cycle lui-même augmente bien avec la température.

Cela suggère que d'autres facteurs que le seul rendement thermodynamique doit intervenir pour expliquer la tendance observée sur l'efficacité P2P.

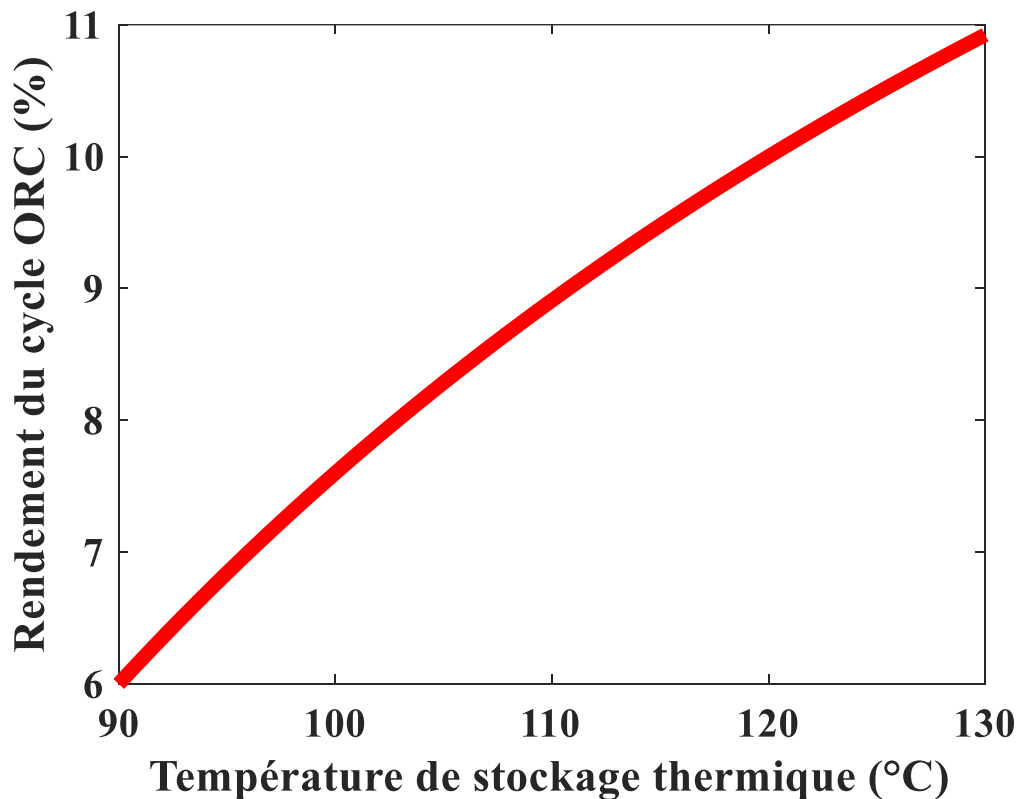


FIGURE III.3. RENDEMENT DU CYCLE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE STOCKAGE THERMIQUE

La figure III.4. présente l'évolution du COP en fonction de la température de stockage thermique. Cependant, contrairement avec celui de la source de chaleur, on observe que le COP diminue avec l'augmentation de la température de stockage. Cette évolution du COP peut s'expliquer par plusieurs facteurs tels que les pertes thermiques : À plus haute température, les pertes thermiques du système peuvent devenir plus importantes, réduisant ainsi la performance de stockage du système. Les matériaux et composants du système peuvent avoir des limites de fonctionnement à très haute température, entraînant des performances dégradées. D'autres phénomènes physiques, tels que la dégradation des matériaux ou des réactions chimiques indésirables, peuvent se produire à haute température et affecter négativement le COP.

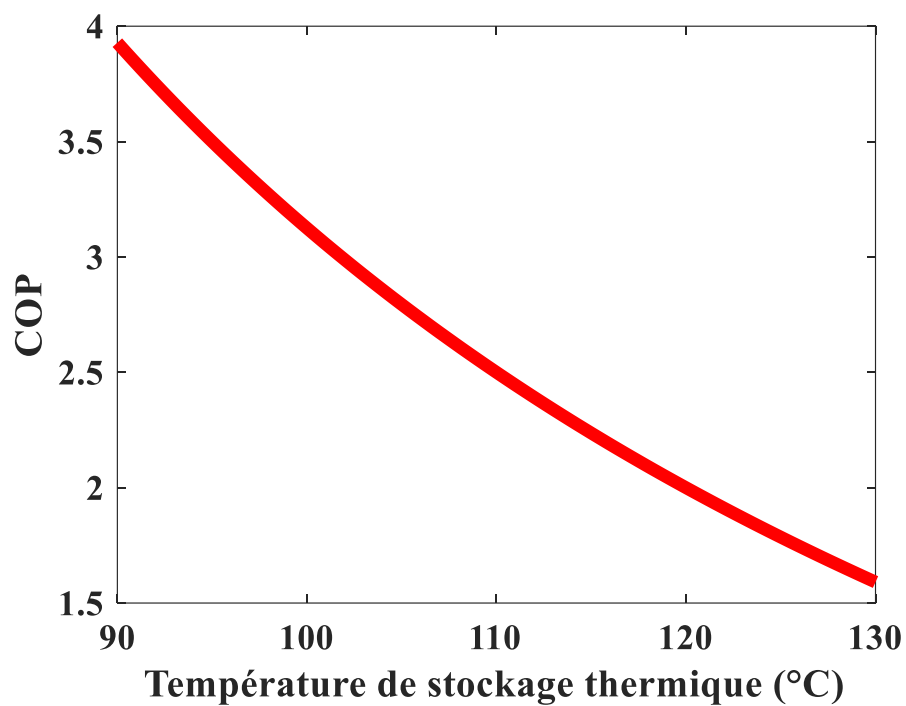


FIGURE III.4. EVOLUTION DU COP EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE STOCKAGE THERMIQUE

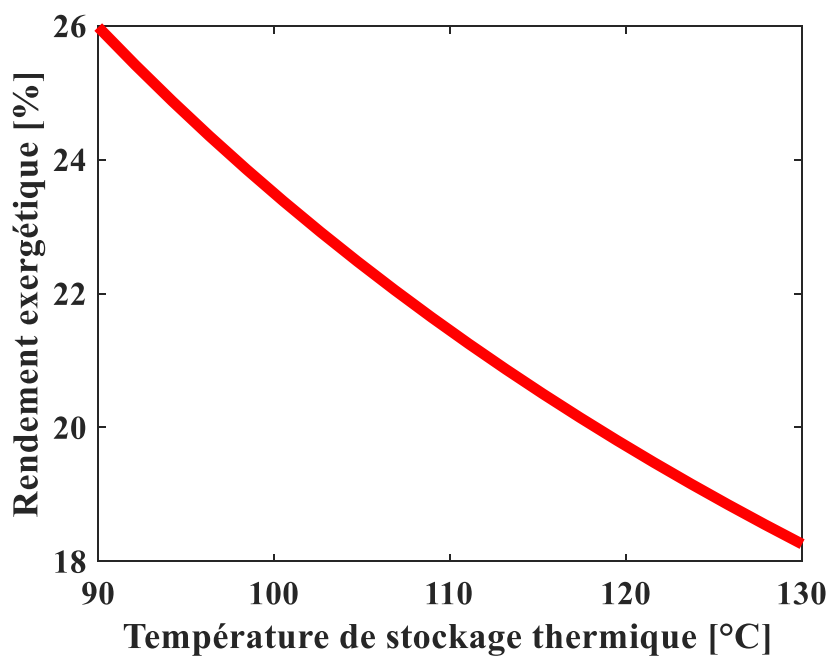


FIGURE III.5. EVALUATION DE L'EFFICACITE EXERGETIQUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE STOCKAGE

La **Figure III.5** présente l'évolution de l'efficacité exergétique en fonction de la température de stockage thermique. On observe que lorsque la température de stockage thermique est basse (proche de 90°C), le système fonctionne avec une différence de température élevée entre la source chaude et la source froide. Cela se traduit par un rendement exergétique élevé, car l'écart de température permet d'extraire un maximum d'énergie utile du système. À mesure que la température de stockage thermique augmente, la différence de température entre la source chaude et la source froide diminue. Cela se traduit par une baisse progressive du rendement exergétique, car le système ne peut plus exploiter autant d'énergie utile. Lorsque la température de stockage devient très élevée (proche de 130°C), la différence de température entre la source chaude et la source froide devient trop faible. Le rendement exergétique chute alors de manière significative, car le système ne peut plus convertir efficacement l'énergie thermique en travail utile. D'où le rendement exergétique du système HP-ORC Carnot battery suit une relation inverse à la température de stockage thermique. Plus la température de stockage est élevée, plus le rendement exergétique diminue. Cette relation s'explique par les principes thermodynamiques qui régissent le fonctionnement du cycle de Rankine et la capacité du système à exploiter la différence de température entre la source chaude et la source froide.

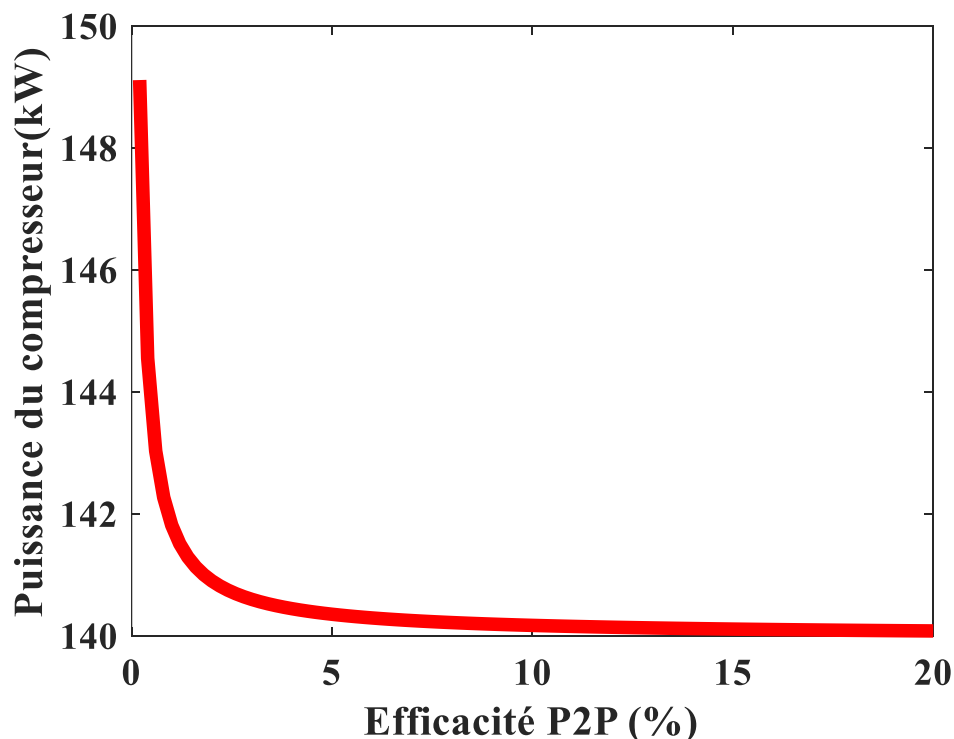


FIGURE III.6. SENSIBILITE DE LA PUISSANCE DU COMPRESSEUR PAR RAPPORT A L'EFFICACITE P2P

La **Figure III.6** présente sensibilité de la puissance du compresseur par rapport à l'efficacité P2P. Ainsi, lorsque l'efficacité P2P augmente, cela signifie que le système est capable de produire plus d'électricité lors de la décharge pour une même quantité d'énergie électrique utilisée lors de la charge. Cette amélioration de l'efficacité se traduit par une réduction de la puissance électrique nécessaire pour faire fonctionner le compresseur lors de la phase de charge. En effet, si le système est capable de restituer une plus grande partie de l'énergie stockée, il n'a pas besoin de dépenser autant d'énergie électrique pour charger le système. Par conséquent, la puissance électrique requise par le compresseur diminue lorsque l'efficacité P2P augmente. En résumé, lorsque l'efficacité P2P du système de stockage d'énergie augmente, la puissance électrique nécessaire pour faire fonctionner le compresseur lors de la phase de charge diminue, car le système est capable de restituer une plus grande partie de l'énergie stockée.

III.3. Résultats d'analyse économique

Le graphique de la **Figure III.7** montre clairement l'évolution du coût de cycle de vie (LCOS) d'un système de batterie à cycle de Carnot en fonction de la température de stockage thermique. On observe que le LCOS diminue de façon significative lorsque la température de stockage thermique augmente, passant de près de 0,236 FCFA/kWh à 90°C à environ 0,163 \$/kWh à 130°C. Cette tendance s'explique par l'amélioration du rendement de Carnot lorsque la température de stockage thermique est plus élevée. En effet, un écart de température plus important entre la source chaude et la source froide permet d'obtenir un meilleur rendement thermodynamique, ce qui se traduit par une augmentation de l'énergie produite pour un même investissement. Cela met en évidence l'intérêt de développer des systèmes de stockage thermique capables d'atteindre des températures élevées (>100°C) afin d'optimiser l'efficacité globale du système. D'un point de vue économique, les économies d'échelle liées à l'augmentation de la capacité de la batterie permettent également de réduire significativement le LCOS. Cela suggère qu'il est préférable de privilégier le développement de systèmes de stockage de grande capacité, plutôt que de multiplier les petites unités, lorsque cela est techniquement et économiquement faisable.

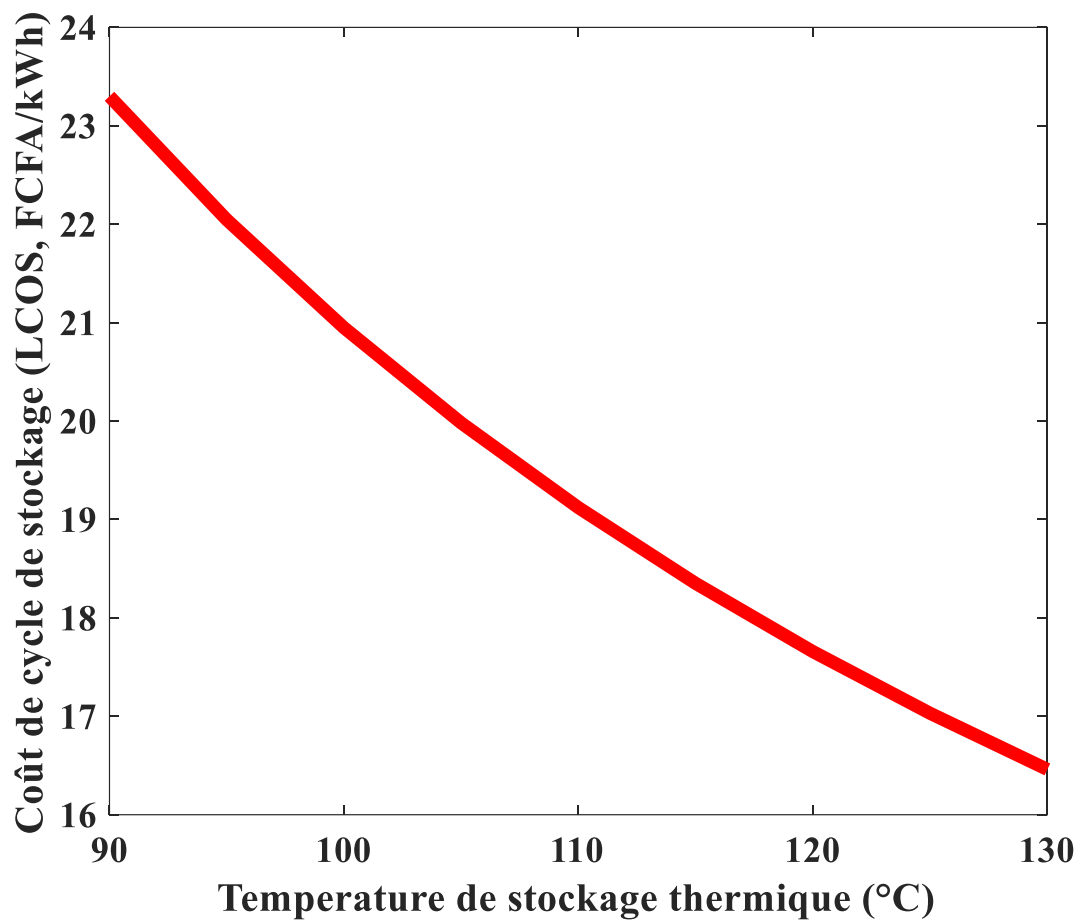


FIGURE III.7. LE COUT DU CYCLE DE STOCKAGE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE STOCKAGE THERMIQUE

La **Figure III.8** présente l'évaluation de coût du cycle de stockage en fonction de la température de stockage thermique et de la capacité de la batterie. On peut observer que le coût du cycle de stockage diminue de manière significative lorsque la température de stockage thermique augmente. En effet, à faible température ($< 100^{\circ}\text{C}$), le coût du cycle de stockage est très élevé, atteignant plus de 23,2 FCFA/kWh. Cependant, lorsque la température de stockage thermique dépasse 100°C , le coût du cycle de stockage chute drastiquement, pouvant atteindre moins de 15 FCFA/kWh. Par ailleurs, l'influence de la capacité de la batterie sur le coût du cycle de stockage est moins marquée. Néanmoins, on observe une légère tendance à la baisse du coût lorsque la capacité de la batterie augmente. Cela s'explique principalement par les meilleures

performances et la plus grande efficacité des systèmes de stockage thermique à haute température, permettant de réduire les coûts d'investissement et d'exploitation.

La capacité de la batterie a également une influence positive, mais dans une moindre mesure. Ces résultats soulignent l'intérêt de développer des technologies de stockage thermique à haute température afin d'optimiser les coûts des systèmes de stockage d'énergie à grande échelle.

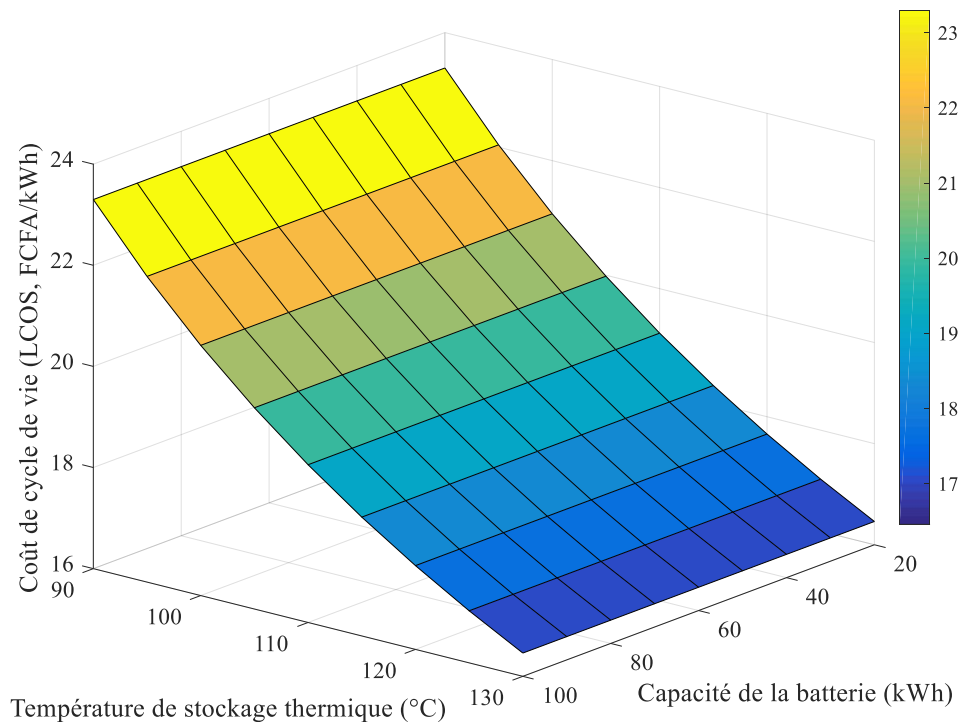


FIGURE III.8. EVALUATION DE COUT DU CYCLE DE STOCKAGE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE STOCKAGE THERMIQUE ET DE LA CAPACITE DE LA BATTERIE

Le coût d'investissement total évalué à 3 Milliards de FCFA pour une puissance électrique générée à 25 000 MWh et donc la répartition des coûts initiaux pour chaque composant du système est présentée à la **Figure III.9**.

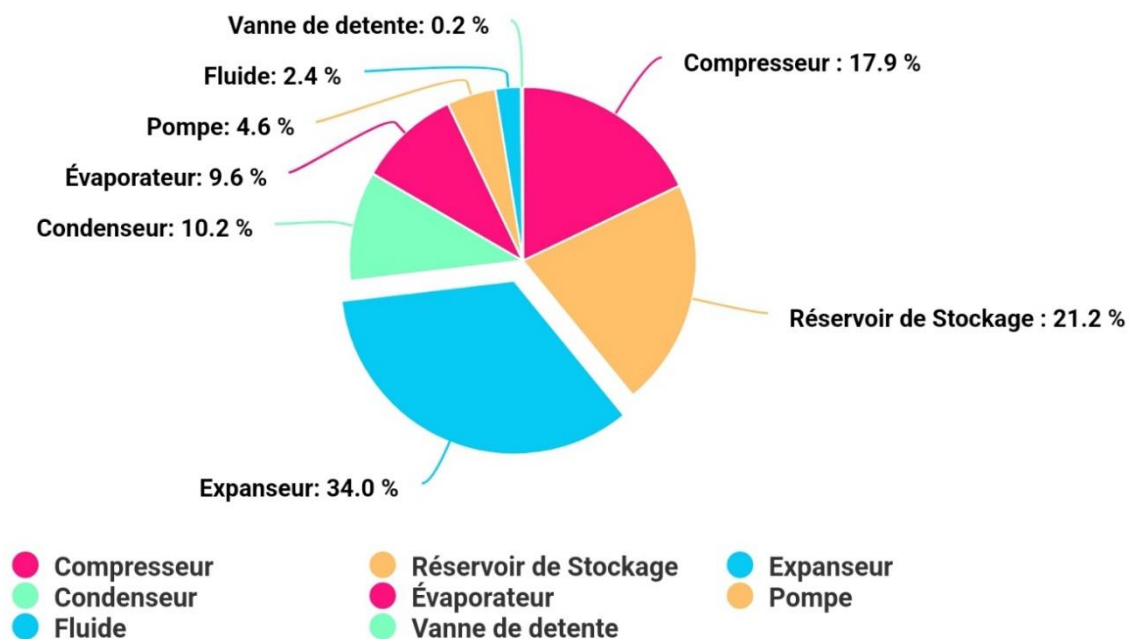


FIGURE III.9. COÛTS INITIAUX DES DIFFÉRENTS COMPOSANTS DU SYSTÈME

A la **Figure III.9**, on peut voir que l'expandeur est l'élément le plus coûteux du système avec 34 % du coût initial. Suivie du réservoir de stockage d'énergie avec 21,2 %, du compresseur avec 17,9 %, du condenseur avec 10,2 %, de l'évaporateur avec 9,6 %, des pompes avec 4,6 % puis du fluide caloporteur avec 2,4 % et de la vanne de détente avec 0,2 % respectivement sur le coût initial du système.

Conclusion

Ce dernier chapitre a été l'objet de la présentation des résultats et de leurs interprétations de la simulation. Différents paramètres ont été simulés tels que l'efficacité énergétique et exergetique, l'énergie générée, le coefficient de performance, le coût de cycle de stockage, la capacité de stockage et la température de stockage thermique qui sont des paramètres ultimes pour l'optimisation du système. Ainsi la suite de ce travail est concentrée à la conclusion générale et aux principaux résultats scientifiques de cette étude.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail, la motivation et l'état de l'art ont été explorés pour les solutions de stockage d'énergie, et la batterie Carnot a été présentée comme une technologie appropriée pour remplacer les systèmes actuels avec des rapports puissance/capacité relativement faibles. Ainsi, un modèle numérique a été développé pour simuler les performances d'une batterie Carnot composée d'une simple pompe à chaleur, à compression de vapeur et de cycles Rankine organiques dans des conditions de charge/décharge dynamiques, ainsi que des comportements thermiques d'un stockage sensible.

- D'un point de vue thermodynamique, il est clair que l'amélioration du rendement de Carnot avec l'augmentation de la température de stockage thermique est un facteur clé pour réduire le LCOS ;
- L'augmentation de l'efficacité power-to-power (P2P) d'un système de batterie à cycle de Carnot permet de réduire la puissance requise pour le compresseur, ce qui se traduit par une diminution de la consommation d'énergie et des coûts d'exploitation.
- La puissance de la turbine, quant à elle, reste constante quel que soit le niveau d'efficacité P2P, car elle dépend uniquement des températures de la source chaude et de la source froide.
- L'optimisation de l'efficacité P2P est donc un levier important pour améliorer les performances et la viabilité économique des systèmes de stockage d'énergie thermique à cycle de Carnot.
- Les résultats obtenus démontrent l'importance de prendre en compte les aspects thermodynamiques dans la conception et l'évaluation de ces systèmes de stockage d'énergie, en plus des aspects économiques.
- Les courbes obtenues peuvent être utilisées pour dimensionner de manière optimale les composants du système (compresseur, turbine, échangeurs de chaleur, etc.) en fonction des objectifs de performance et de coût visés.

Cette étude montre que l'optimisation du système de stockage à batterie Carnot est nécessaire pour minimiser le coût de cycle de vie d'un tel système de stockage d'énergie.

D'autant plus qu'elle offre des avantages tels que le libre choix du site, une faible empreinte environnementale, une espérance de vie la plus élevée et une capacité de sauvegarde optionnelle à faible coût. En perspective il est important de noter que le stockage de Carnot est un concept théorique et qu'il n'existe pas encore de système de stockage pratique qui puisse atteindre l'efficacité théorique maximale du cycle de Carnot. Une conception physique du système et des études expérimentales seront très efficaces pour l'avancer de la science.

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

Bibliographie et webographie

- [1] BMUV, National climate policy of Germany, 2022, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection - National Climate Policy. <https://www.bmuv.de/en/topics/climate-adaptation/climate-protection/national-climate-policy>.
- [2] Sixth Assessment Report on Climate Change (IPCC), 2022, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- [3] IRENA, World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2022.
- [4] Z. Topalović, R. Haas, A. Ajanović, A. Hiesl, Economics of electric energy storage. The case of Western Balkans, *Energy* 238 (2022) 121669, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.121669>.
- [5] statista Handelsblatt, Kapazität von Großbatteriespeichern zur Netzstabilisierung in Deutschland in den Jahren von 2015 bis 2018, 2022, Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/872079/umfrage/kapazitaet-von-grossbatteriespeichern-zur-netzstabilisierung-in-deutschland/>.
- [6] A.V. Olympios, J.D. McTigue, P. Sapin, C.N. Markides, Pumped-Thermal Electricity Storage Based on Brayton Cycles, in: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 2021, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-819723-3.00086-X>, B978012819723300086X.
- [7] D.C. Stack, D. Curtis, C. Forsberg, Performance of firebrick resistance-heated energy storage for industrial heat applications and round-trip electricity storage, *Appl. Energy* 242 (2019) 782–796, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.100>.
- [8] G. Schneider, H. Maier, J. Häcker, S. Siegele, Electricity Storage With a Solid Bed High Temperature Thermal Energy Storage System (HTSET) - A Methodical Approach to Improve

the Pumped Thermal Grid Storage Concept:, in: 14th International Renewable Energy Storage Conference 2020, IRES 2020, Bonn, Germany, 2021, <http://dx.doi.org/10.2991/ahe.k.210202.005>

[9] IRENA, Innovation Outlook: Thermal Energy Storage, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab EmiraSET, 2020.

[10] A. Olabi, C. Onumaegbu, T. Wilberforce, M. Ramadan, M.A. Abdelkareem, A.H. Al - Alami, Critical review of energy storage systems, Energy 214 (2021) 118987, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.118987>.

[11] C.K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T.S. Mahmoud, D. Habibi, Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality, Renew. Sustain. Energy Rev. 91 (2018) 1205–1230, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.068>

[12] O. Dumont, G.F. Frate, A. Pillai, S. Lecompte, M. De paepe, V. Lemort, Carnot battery technology: A state-of-the-art review, J. Energy Storage 32 (2020) 101756, <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2020.101756>.

[13] V. Novotny, V. Basta, P. Smola, J. Spale, Review of Carnot Battery Technology Commercial Development, Energies 15 (2) (2022) 647, <http://dx.doi.org/10.3390/en15020647>.

[14] T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, J.-F. Fourmigué, A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems, Sol. Energy 153 (2017) 628–654, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.032>.

[15] J. Gasia, L. Miró, L.F. Cabeza, Review on system and materials requirements for high temperature thermal energy storage. Part 1: General requirements, Renew. Sustain. Energy Rev. 75 (2017) 1320–1338, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.119>.

2016.11.119.

[16] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolado, B. Zalba, L.F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization, Renew. Sustain. Energy Rev. 14 (1) (2010) 31–55, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>.

-
-
- [17] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, L.F. Cabeza, State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (1) (2010) 56–72, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.036>
- [18] T. Liang, A. Vecchi, K. Knobloch, A. Sciacovelli, K. Engelbrecht, Y. Li, Y. Ding, Key components for Carnot Battery: Technology review, technical barriers and selection criteria, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 163 (2022) 112478, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112478>
- [19] I.T.C. Programme, G.A. Center, IEA Energy Storage TASK 36 - Carnot Batteries, 2022, <https://www.eces-a36.org/>
- [20] W.-D. Steinmann, Thermo-mechanical concepts for bulk energy storage, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 75 (2017) 205–219, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.065>
- [21] J. Lizana, R. Chacartegui, A. Barrios-Padura, J.M. Valverde, C. Ortiz, Identification of best available thermal energy storage compounds for low-to-moderate temperature storage applications in buildings, *Mater. Constr.* 68 (331) (2018) 160, <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2018.10517>
- [22] T. Bauer, W.-D. Steinmann, D. Laing, R. Tamme, Thermal energy storage materials and systems, *Ann. Rev. Heat Transfer* 15 (15) (2012) 131–177, <http://dx.doi.org/10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2012004651>.
- [23] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18 (2013) 327–349, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>.
- [24] L. Miró, J. Gasia, L.F. Cabeza, Thermal energy storage (SET) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review, *Appl. Energy* 179 (2016) 284–301, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.147>.
- [25] S. Puschnigg, J. Lindorfer, S. Moser, T. Kienberger, Techno-economic aspects of increasing primary energy efficiency in industrial branches using thermal energy storage, *J. Energy Storage* 36 (2021) 102344, <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2021.102344>.

-
-
- [26] M. Krüger, S. Muslubas, T. Loeper, F. Klasing, P. Knödler, C. Mielke, Potentials of Thermal Energy Storage Integrated into Steam Power Plants, *Energies* 13 (9) (2020) 2226, <http://dx.doi.org/10.3390/en13092226>.
- [27] D. Laing, D. Lehmann, M. Fiß, C. Bahl, SETt Results of Concrete Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants, *J. Solar Energy Eng.* 131 (4) (2009) 041007, <http://dx.doi.org/10.1115/1.3197844>.
- [28] S. Zunft, M. Hänel, M. Krüger, V. Dreißigacker, F. Göhring, E. Wahl, Jülich Solar Power Tower—Experimental Evaluation of the Storage Subsystem and Performance Calculation, *J. Solar Energy Eng.* 133 (3) (2011) 031019, <http://dx.doi.org/10.1115/1.4004358>.
- [29] M. von der Heyde, G. Schmitz, Electric Thermal Energy Storage Based on Packed Bed, in: *Encyclopedia of Energy Storage*, 2022, pp. 108–121, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-819723-3.00053-6>.
- [30] E.S. TCP, IEA Technology Collaboration Programme Newsletter, 2022, IEA. <https://mailchi.mp/3fdf3c968490/iea-es-tcp-newsletter-september-2021?e=4b98bf90a8>.
- [31] S. Jülich, multiSETS – Store Energy Congress, 2022, Kraftanlagen Energies & Services GmbH. https://www.storeenergy.de/siSET/storeenergy.de/files/media_document/2021-10/rabea_dluhosch_abstract_2021.pdf.
- [32] A. Robinson, Ultra-high temperature thermal energy storage. Part 1: Concepts, *J. Energy Storage* 13 (2017) 277–286, <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2017.07.020>.
- [33] A. Robinson, Ultra-high temperature thermal energy storage. Part 2: Engineering and operation, *J. Energy Storage* 18 (2018) 333–339, <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2018.03.013>.
- [34] L. Sanz Garcia, E. Jacquemoud, P. Jenny, Thermo-economic heat exchanger optimization for Electro-Thermal Energy Storage based on transcritical CO₂ cycles, in: *Conference Proceedings of the European SCO₂ Conference 3rd European Conference on Supercritical CO₂ (SCO₂) Power Systems 2019: 19th-20th September 2019*, DuEPublico:

Duisburg-Essen Publications online, University of Duisburg-Essen, Germany, 2019, p. 353, <http://dx.doi.org/10.17185/DUEPUBLICO/48917>.

[35] A. Benato, Performance and cost evaluation of an innovative Pumped Thermal Electricity Storage power system, *Energy* 138 (2017) 419–436, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.066>.

[36] P. Peng, L. Yang, A. Menon, N. Weger, R. Prasher, H. Breunig, S. Lubner, Techno-Economic Analysis of High-Temperature Thermal Energy Storage for On-Demand Heat and Power, 2022, p. 18, <http://dx.doi.org/10.26434/chemrxiv-2022-3l03r-v2>.

[37] S. Lechner, K. Behler, F. Holy, D. Thölken, T. Ascher, F. von der Grün, M. Richter, Sektorenübergreifender Hochtemperaturspeicher zum Ausgleich volatiler erneuerbarer Stromerzeugung, 2020, <http://dx.doi.org/10.2314/KXP:1745063919>.

[38] F. Holy, M. Textor, S. Lechner, Gas turbine cogeneration concepts for the pressureless discharge of high temperature thermal energy storage units, *J. Energy Storage* (2021) 11, <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2021.103283>.

[39] F. Holy, A. Paul, M. Textor, S. Lechner, N. Metka, F. Klaus, Sensibler Hochtemperaturspeicher bis 1200°C mit extern beheiztem Gasturbinenprozess - Entwicklung und Simulation einer neuartigen Carnot-Batterie zur dezentralen Sektorenkopplung, in: *Kraftwerkstechnik*, Vol. 54, Saxonia, Dresden, Germany.

[40] M. Gong, F. Ottermo, High-temperature thermal storage in combined heat and power plants, *Energy* 252 (2022) 124057, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2022.124057>.

[41] S. Jülich, Energy Storage Projects; SETS 2.0, 2021, <https://www.fh-aachen.de/en/research/solar-institute-juelich/focus-areas/projects-energy-storage/>.

[42] S. Trevisan, R. Guédez, B. Laumert, Thermo-economic optimization of an air driven supercritical CO₂ Brayton power cycle for concentrating solar power plant with packed bed thermal energy storage, *Sol. Energy* 211 (2020) 1373–1391, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.069>.

-
- [43] J. Yang, Z. Yang, Y. Duan, Off-design performance of a supercritical CO₂ Brayton cycle integrated with a solar power tower system, *Energy* 201 (2020) 117676, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.117676>.
- [44] A. Benato, A. Stoppato, Heat transfer fluid and material selection for an innovative Pumped Thermal Electricity Storage system, *Energy* 147 (2018) 155–168, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.045>.
- [45] S. Houssainy, M. Janbozorgi, P. Kavehpour, Thermodynamic performance and cost optimization of a novel hybrid thermal-compressed air energy storage system design, *J. Energy Storage* 18 (2018) 206–217, <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2018.05.004>.
- [46] M. Mahmood, A. Traverso, A.N. Traverso, A.F. Massardo, D. Marsano, C. Cravero, Thermal energy storage for CSP hybrid gas turbine systems: Dynamic modelling and experimental validation, *Appl. Energy* 212 (2018) 1240–1251, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.130>.
- [47] D. Stevanovic, High Temperature Energy Storage (HiSET) with Pebble Heater Technology and Gas Turbine, in: X. Chen, W. Cao (Eds.), *Advancements in Energy Storage Technologies*, InTech, 2018, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75093>
- [48] Yu XH, Qiao HN, Yang B, et al. Thermal-economic and sensitivity analysis of different Rankine-based Carnot battery configurations for energy storage. *Energ Conver Manage* 2023;283:116959
- [49] <https://www.usinenouvelle.com/article/au-salon-mix-e-stolect-presente-sa-solution-de-stockage-d-electricite-sous-forme-de-chaueur.N1993487>
- [50] Sara EL AFIA. Assessment of Carnot Batteries as novel electricit storage solutions. Mémoire de master. Faculty of Siences and Techniques of Tangier. 29/07/2020.
- [51] S. Staub et al., « Pompes à chaleur réversibles – Systèmes à cycle de Rankine organique pour le stockage de l'électricité renouvelable » *Energies*, vol. 11, n 06 , p. 1352, mai 2018, doi : 10.3390/en11061352.
- [52] Fan, R., & Xi, H. (2022). Energy, exergy, economic (3E) analysis, optimization and comparison of different Carnot battery systems for energy storage. *Energy Conversion and Management*, 252, 115037. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115037>