

REPUBLIQUE ALGERIENNE DMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah / Ouargla
Faculté Des Sciences Appliquées
Département De Génie Mécanique



**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de
Master Académique**

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Présenté par :
KAT Omar et GURRIDA Belkhir

**Etude d'une machine à absorption solaire du point
de vue de la capacité de stockage thermique**

Soutenu publiquement le :
12/06/2023

Devant le jury :

Dr. ZIANI Lotfi	MCB	Président	U.K.M. Ouargla
Dr. MESSAOUDI Djilali	MAB	Examineur	U.K.M. Ouargla
Dr. CHERRAD Noureddine	MCA	Encadreur	U.K.M. Ouargla

Année universitaire : 2022-2023

AVERTISSEMENT PREALABLE

Ce document a été réalisé par des étudiants inscrits en Master Énergétique, filière Génie Mécanique, dans le cadre de leur formation académique. Il ne possède pas un statut de publication scientifique au sens strict du terme, puisqu'il n'a pas fait l'objet d'une évaluation par un comité de lecture avant sa publication. Le contenu de ce travail a été évalué uniquement par les membres du jury, lors de la soutenance orale et de la présentation éventuelle de supports multimédias, dans le cadre de l'évaluation finale des étudiants en vue de l'obtention de leur diplôme de Master. Il convient de souligner que cette évaluation est de nature privée et n'est pas communiquée ici.

Par conséquent, le contenu de ce document est entièrement de la responsabilité de ses auteurs, les étudiants, et doit être utilisé avec discernement. Le lecteur est donc invité à faire preuve de jugement critique lors de sa lecture.

Toute reproduction totale ou partielle de ce document doit faire référence à son origine et aux auteurs mentionnés dans le document lui-même. Il est impératif de vérifier explicitement les références avant de les citer.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma chère mère, la prunelle de mes yeux Ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force, ton affection me couvre et ta bienveillance me guide quoi que je fasse ou je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit.

A mon cher papa Tu as toujours été à mes côtés pour m'encourager et me soutenir, que ce travail traduit mon affection et ma gratitude

A mon très cher grand-père Mahmoud pour son encouragement durant toutes mes années d'études que dieu le protège

A Dr. Aliouat Khadra pour tout ce qui nous a donné durant toute cette année, pour son aide et sa patience

A tous ceux qui m'ont aidé et ceux qui ont partagé avec moi les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail

Merci !

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur :pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire et pour ses conseils et l'aide qu'il nous a apportés.

Nous adressons également nos sincères remerciements particulier au Dr : ALIOUAT Khadra Co-encadreur de nous avoir oriente, aide et conseille. Pour le temps qu'il a consacré à nous apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche.

Nous remercions particulièrement les membres du jury qui ont participés succès de ce mémoire par leurs observations et leurs orientations pédagogiques

Nous envoyons également nos remerciements les plus dévoues au membre de jury pour avoir gentiment accepte de juger notre travail et qui nous avons honnore avec leurs présence

Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de nos familles, surtout nos parents qui nous ont toujours encourage moralement et matériellement et a qui on tient a les remercier.

Merci !

Résumé

Ce travail de recherche se concentre sur l'étude de la machine solaire à absorption dans le contexte du stockage thermique. L'objectif est de démontrer la viabilité du stockage thermique solaire à long terme en utilisant une absorption à haute densité d'énergie. Nous présentons une méthode de stockage de l'énergie solaire thermique basée sur l'absorption, en mettant en évidence l'utilisation des paires d'absorption LiBr-H₂O. Ces systèmes de stockage à absorption offrent des avantages tels que le faible entretien et l'absence de machines mécaniques puissantes. De plus, ils permettent une utilisation efficace de l'énergie thermique solaire, contribuant ainsi à l'optimisation de l'exploitation des ressources naturelles. Nous examinons également les principales méthodes de stockage thermique solaire par absorption, soulignant l'importance de l'absorption comme une méthode utile pour le stockage thermique à long terme. En conclusion, notre étude démontre la faisabilité du stockage solaire thermique à long terme basé sur une absorption à haute densité d'énergie. Ces systèmes peuvent également être utilisés à court terme pour le refroidissement nocturne estival. Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour l'utilisation de ces systèmes de stockage à absorption dans des régions chaudes et arides, contribuant ainsi à l'optimisation de l'utilisation de l'énergie solaire thermique.

Mots clés : Absorption , énergie solaire , stockage thermique , thermodynamique ,

ملخص

تركز هذه الدراسة على دراسة آلة الامتصاص الشمسية في سياق التخزين الحراري. الهدف هو إظهار جدوى التخزين الحراري الشمسي على المدى الطويل باستخدام امتصاص ذو كثافة طاقة عالية. نقدم طريقة لتخزين الطاقة الحرارية الشمسية بناءً على الامتصاص، مع تسليط الضوء على استخدام أزواج الامتصاص "LiBr-H₂O". توفر أنظمة التخزين بالامتصاص مزايًا مثل صيانة منخفضة وعدم وجود آلات ميكانيكية قوية. بالإضافة إلى ذلك، فإنها تسمح باستخدام فعال للطاقة الحرارية الشمسية، مما يساهم في تحسين استغلال الموارد الطبيعية. ندرس أيضًا أهم طرق التخزين الحراري الشمسي بالامتصاص، مع التأكيد على أهمية الامتصاص كطريقة مفيدة للتخزين الحراري على المدى الطويل. في الختام، تبين دراستنا جدوى التخزين الحراري الشمسي على المدى الطويل بناءً على امتصاص ذو كثافة طاقة عالية. يمكن أيضًا استخدام هذه الأنظمة على المدى القصير للتبريد في الليالي الصيفية. تفتح هذه النتائج آفاقًا مثيرة للاهتمام لاستخدام أنظمة التخزين بالامتصاص في المناطق الحارة والجافة، مما يساهم في تحسين استخدام الطاقة الحرارية الشمسية.

الكلمات المفتاحية : الامتصاص ، الطاقة الشمسية ، التخزين الحراري ، الديناميكية الحرارية

Liste Des Figures

Figure 1 : Schéma de principe de fonctionnement des machines thermiques.....	4
Figure 2 : Schéma de principe de fonctionnement des machines thermiques.....	5
Figure 3 : Schéma de principe d'une machine à absorption à simple effet.....	6
Figure 4 : Représentation schématique d'une machine à absorption simple effet.....	8
Figure 5 : Représentation d'un exemple de cycle thermodynamique d'une machine à absorption à simple effet dans un diagramme d'Oldham.....	8
Figure 6 : Représentation des points caractéristiques du cycle à absorption sur un diagramme d'Oldham, couple H ₂ O/LiBr.....	12
Figure 7 : Diagramme de Merkel du couple H ₂ O/LiBr.....	13
Figure 8 : Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.....	19
Figure 9 : une représentation schématique des nœuds du TES.....	19
Figure 10 : Classification de stockage de l'énergie thermique selon le type de réaction.....	23
Figure 11 : Classification des différents types de stockage thermique.....	24
Figure 12 : Densité d'énergie des methods de stockage à haute énergie.....	26
Figure 13 : Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique....	27
Figure 14 : schéma de générateur.....	33
Figure 15 : schéma de condenseur.....	34
Figure 16 : schéma de évaporateur.....	34
Figure 17 : schéma de absorbeur.....	35
Figure 18 : Schéma de principe d'une machine à absorption à simple effet.....	39
Figure 19 : L'enthalpie en fonction des différents points du cycle de la machine à absorption liquide (LiBr/H ₂ O).....	43
Figure 20 : Coefficient de performance COP en fonction de température du générateur T _g ..	43
Figure 21 : représente la quantité de chaleur fournie au générateur Q _g	44
Figure 22 : coefficient de performance COP en fonction de température du générateur T _{ev} ..	45

Liste Des Tableaux

Tableau 1 : Propriété thermodynamique des points et les performances de la machine à absorption présentée par Fluoride.....	41
Tableau 2 : Flux d'énergie au niveau des différents composants du système.	42
Tableau 3 : Propriétés thermodynamiques des points de la machine d'absorption $T_g=90^{\circ}\text{C}$. .	42

Nomenclature :

Général

L	Longueur	m
S	Surface	m^2
dt	Temps	S
Δh	Enthalpie spécifique	KJ/kg
t	Temps	S
T	Température	$^{\circ}C$
\dot{m}	Débit massique	Kg/s
m	Masse	Kg
C_p	Capacité thermique massique	$J/kg.^{\circ}C$
Q	Quantité d'énergie	KJ
Q	Puissance	W
I	Eclairement solaire total sur la surface du capteur	W/m^2
E	Energie	J
P	Pression	Pa
X	Fraction massique de bromure de de lithium dans la solution	%
a_1	Coefficient de déperdition de premier ordre du capteur	$w/m^2.^{\circ}C$
U	Coefficient de transfert thermique	$w/m^2.^{\circ}C$
W	Travail	W
λ	Conductivité thermique	$w/m.^{\circ}C$
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
μ	Viscosité dynamique	$Pa.s$
ω	Vitesse de l'eau dans les tubes	m/s
d	Diamètre	m
m_1	Débite massique de la vapeur d'eau	Kg/s
m_{sp}	Débite massique de la solution pauvre	Kg/s
m_{sr}	Débite massique de la solution riche	Kg/s
K	Coefficient global de transfert de chaleur	$w/m^2.^{\circ}C$
v	La vitesse	m/s

Indices/Exposants

<i>tank</i>	Réservoir
<i>m</i>	Moyenne
f	Final
<i>i</i>	Initial
<i>a</i>	Ambiante
<i>COP</i>	Coefficient de Performance
<i>LiBr</i>	Bromure de lithium
<i>H₂O</i>	Eau
<i>b</i>	Bâtiment
<i>c</i>	Condenseur
<i>ev</i>	Evaporateur
<i>ab</i>	Absorbeur
<i>sc</i>	Capteur solaire thermique
<i>ext</i>	Extérieur (atmosphérique)
<i>int</i>	Intérieur (bâtiment)
<i>g = b</i>	Générateur (bouilleur)
<i>is</i>	Isentropique
<i>liq</i>	Liquide
<i>loss</i>	Perte
<i>Max</i>	Maximum
<i>Sh</i>	Paroi de l'enveloppe
<i>U</i>	Vapeur
<i>Sol</i>	Solution
η	Rendement
<i>s_r</i>	Solution riche
<i>s_p</i>	Solution pauvre

Table Des Matières

Dédicace	I
Remerciement.....	II
Résumé	III
Liste Des Figures.....	IV
Liste Des Tableaux	V
Nomenclature	VI
Introduction générale.....	1

Partie Théorique

CHAPITRE I Etat de l'Art sur les machines à absorption

1. Introduction	4
2. Machine thermique.....	4
2.1. Machines frigorifiques.....	5
2.2. Machine à absorption.....	6
4. Principe de fonctionnement de la machine à absorption	7
5. Les couples utilisés dans les machines	10
5.1. H_2O / NH_3	10
5.2. $LiBr / H_2O$	10
6. Analyse thermodynamique des machines à absorption.....	11
7. Conclusion.....	14

CHAPITRE II Notions sur la capacité de stockage thermique

1. Introduction	16
2. Description des différents types de systèmes de stockage	16
3. Le stockage sous forme d'énergie cinétique	16
4. Le stockage sous forme d'énergie potentielle	16
5. Stockage de l'énergie électrique	17
6. Stockage à base d'eau	17
7. Le stockage thermique de l'énergie solaire	18
8. Classification des systèmes de stockage d'énergie thermique.....	18
9. Les types de systèmes de stockage de l'énergie thermique.....	19
9.1. Stockage de chaleur sensible	20
9.2. Stockage de chaleur latente.....	20
9.3. Stockage de la chaleur chimique.....	21
10. Les solutions de stockage thermique	23

11. Comparaison des solutions de stockage de l'énergie thermique sensible et latente :	24
12. Stockage par sorption	26
13. Stockage d'énergie thermique par absorption.....	27
14. Systèmes de stockage d'énergie mécanique-thermique.....	27
15. Critères de choix et de la conception d'un système de stockage	29

CHAPITRE III Modélisation mathématique

1. Introduction	32
2. Les éléments Principales	32
2.1. Capteurs solaires.....	32
2.2. Générateur	33
2.3. Le condenseur	33
2.4. L'évaporateur.....	34
2.5. L'absorbeur	35
2.6. La pompe.....	35
2.7. Les caractéristiques de BrLi.....	36

CHAPITRE IV Résultats et discussion

1. Introduction	41
2. Principales propriétés des différents points du cycle de la machine à absorption liquide (LiBr/H ₂ O).....	41
3. Caractéristiques thermodynamiques des points et les performances de la machine à absorption	41
4. Comparaison entre les résultats obtenus et les résultats du Fluorure	42
5. Etude paramétrique.....	43
Conclusion générale	46
Références bibliographiques	

Introduction générale:

De nos jours, les progrès technologiques se multiplient et se développent afin de faciliter la vie des individus, d'optimiser les performances d'exploitation des ressources naturelles et de promouvoir une utilisation plus respectueuse de l'environnement. Dans cette dynamique, le domaine du génie mécanique avance à grands pas, surmontant les obstacles et relevant les défis pour améliorer l'ergonomie et l'efficacité des machines. Les machines à absorption constituent un exemple remarquable de cette évolution.

Malgré les inconvénients liés à l'utilisation des machines à absorption pour le stockage de l'énergie thermique, tels que le coût initial élevé, le rendement inférieur par rapport aux machines à compression, ainsi que l'utilisation de fluides potentiellement toxiques et inflammables, ces machines sont considérées comme fiables en raison de l'absence de pièces mécaniques en mouvement, à l'exception des pompes, et de leur faible niveau sonore.

Dans ce travail, nous nous pencherons sur les machines à absorption et leur principe de fonctionnement de manière approfondie. De manière originale et authentique, nous aborderons également leur capacité de stockage thermique. Ainsi, nous avons divisé notre effort en quatre chapitres, regroupés en deux parties. La première partie sera consacrée à une synthèse bibliographique sur le thème de l'étude de la capacité de stockage thermique des machines à absorption. La deuxième partie sera dédiée à l'analyse des données mathématiques, des résultats obtenus et aux discussions qui en découlent. Enfin, nous conclurons ce travail en résumant les points importants qui ont été abordés.

Cette approche nous permettra d'explorer en profondeur les aspects théoriques et pratiques des machines à absorption, en mettant l'accent sur leur potentiel en termes de stockage thermique.

Partie
Théorique

CHAPITRE I

***Etat de l'Art sur les machines à
absorption***

1. Introduction

La machine d'absorption d'énergie solaire est une technologie innovante qui permet de convertir la lumière du soleil en énergie utilisable. Le principe de fonctionnement est l'utilisation de fluides d'absorption, tels que l'ammoniac et liBr, pour capturer la chaleur du soleil. La chaleur récupérée dans le condenseur peut être utilisée pour produire de l'électricité en tournant une turbine ou pour chauffer de l'eau destinées à des applications domestiques ou industrielles. Cependant, la machine d'absorption d'énergie solaire présente des défis tels que son rendement est inférieur à celui des panneaux solaires photovoltaïques et qu'il nécessite souvent des températures élevées pour fonctionner efficacement. Cependant, la machine d'absorption d'énergie solaire continue d'évoluer et de se développer, avec nouvelles avancées technologiques visant à améliorer son rendement et à réduire ses coûts.

2. Machine thermique

Nombreux appareils peuvent être décrits par la thermodynamique : moteurs à essence et diesel, les réfrigérateurs, les pompes à chaleur, les centrales électriques, les usines d'incinération.

Les machines thermiques sont des dispositifs qui permettent de convertir les différentes formes d'énergies (de pression, potentielle, cinétique, thermique, mécanique) entre elles. Ces dispositifs permettent la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et inversement, elles constituent la famille des machines thermiques qui peuvent être réceptrices (moteurs thermiques) ou génératrices de froid ou de chaleur (Larkeche, 2012).

Généralement les moteurs thermiques englobent toute machine thermique transformant de la chaleur en travail, quels que soit, leur mode de fonctionnement et la nature du fluide utilisé pour cette transformation (Larkeche, 2012).

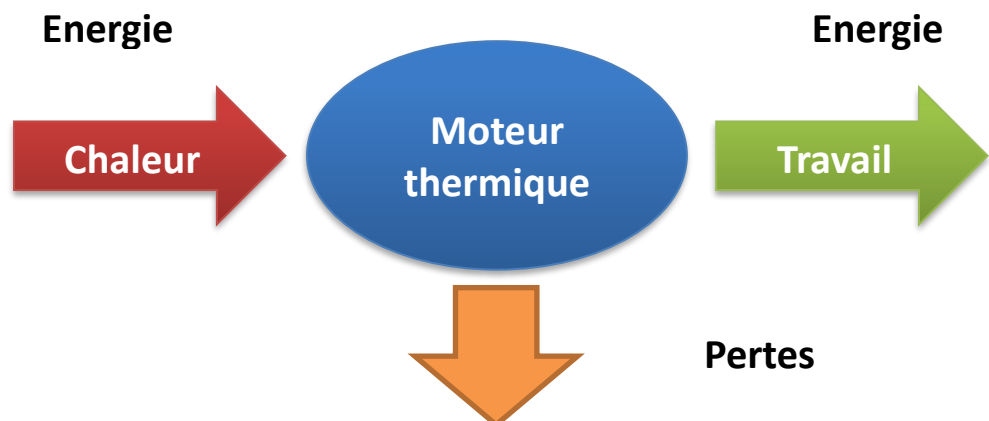


Figure 1 : Schéma de principe de fonctionnement des machines thermiques.

Par contre les machines thermiques consomment du travail pour prélever de la chaleur d'une source froide et la transférer vers une source chaude. Parmi ces machines, on distingue les installations de production de froid (machines frigorifiques), ou de chaleur (les pompes à chaleur) (Larkeche, 2012).

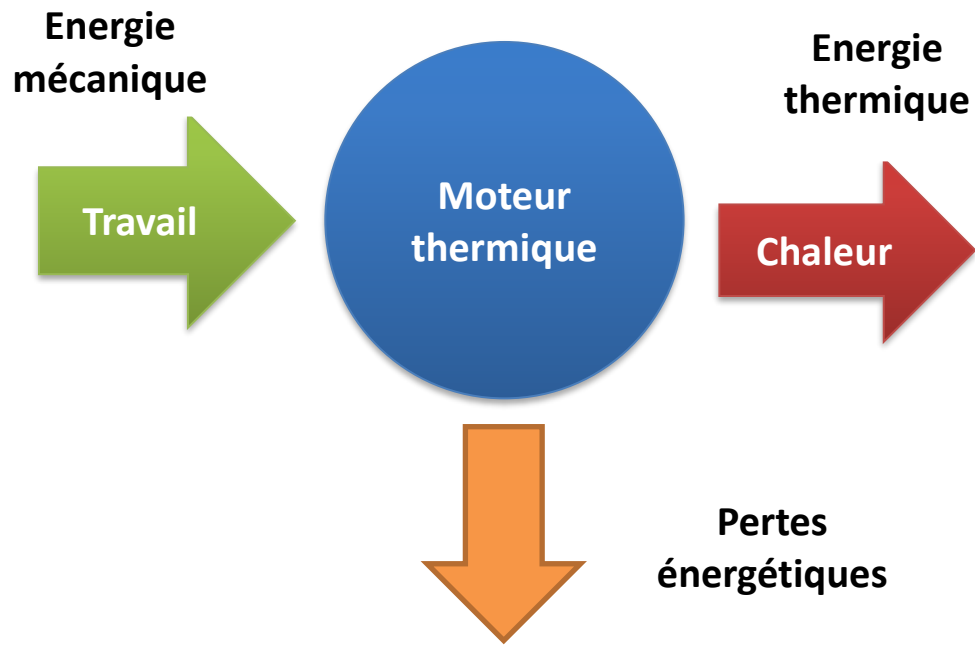


Figure 2 : Schéma de principe de fonctionnement des machines thermiques.

2.1. Machines frigorifiques

Si les systèmes de production du froid sont actuellement nombreux et variés, alors le principe reste toujours le même, il s'agit d'extraire une quantité de chaleur Q_1 d'une source dite source utile à un niveau de température T_1 et injecter une quantité Q_2 à un autre niveau de température T_2 . Si T_1 est inférieure à celle de la source gratuite disponible (à température T_2), d'après le deuxième principe, un tel transfert reste impossible, l'apport d'une énergie est obligatoire. Suivant la nature de cette énergie mise en jeu (chaleur, travail) on distingue deux grandes catégories de machines :

- Machines à compression mécanique qui utilisent le travail comme énergie, elles fonctionnent entre deux sources de chaleur, à titre d'exemple les machines à changement de phase ou les machines à gaz.
- Machines à énergie thermique qui nécessitent un apport de chaleur comme énergie à un niveau de température T_3 . Ces machines fonctionnent généralement entre trois sources de chaleur (machines trithermes), à titre d'exemple les machines à sorption (absorption ou adsorption).

2.2. Machine à absorption

Dans les machines à absorption simple effet, les systèmes à sorption utilisent la capacité de certains matériaux, solides ou liquides, à absorber une substance. Il existe de nombreux cycle à absorption, les cycles à simple effet présentent de faibles efficacités par rapport aux cycles multi effets, mais restent les plus utilisés, vu leur simplicité et leurs faibles températures de source chaude. Ils sont particulièrement adaptés à la climatisation solaire mettant en œuvre des technologies éprouvée de capteurs solaires telles que les capteurs plans (HACHANI, 2018).

Dans une machine à absorption à simple effet, le cycle thermodynamique peut être décrit comme suit: la substance à être absorbée à l'état gazeux, est absorbée par une solution pauvre (SP) dite absorbante. La solution riche (SR) issue de l'absorbeur, est portée à plus haute pression par une pompe de circulation puis préchauffé dans l'échangeur avant d'être introduite au niveau du générateur. La solution est alors chauffée et la substance à être absorbée se résorbe et se condense dans le condenseur, en laissant une solution chaude et concentré qui sera réintroduite au niveau de l'absorbeur après avoir été refroidie. Après le passage par le détendeur la substance à être absorbée s'évapore à basse pression, complétant le cycle d'évaporation/condensation. Le procédé endothermique d'évaporation de la substance à être absorbée absorbe de la chaleur à la source froide (HACHANI, 2018).

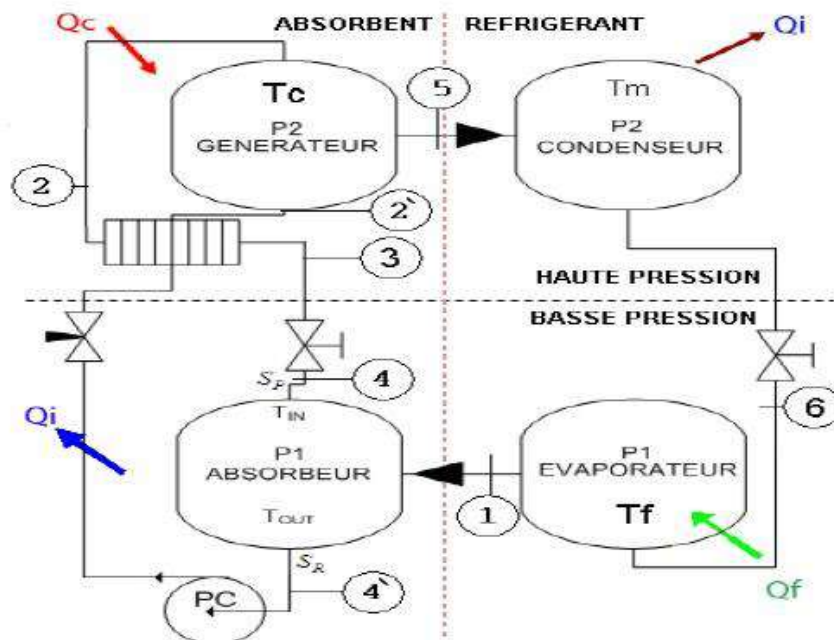


Figure 3 : Schéma de principe d'une machine à absorption à simple effet (HACHANI, 2018).

Dans les machines à absorption double effet, le principe est d'utiliser la chaleur reçus par le générateur deux fois, ainsi la vapeur du réfrigèrent générée par le générateur à premier

effet est condensé à haute pression dans le générateur à double effet. Cependant la chaleur rejetée est utilisée pour produire une vapeur supplémentaire du réfrigérant à partir de la solution provenant du générateur à premier effet. (La chaleur issue de la condensation de la vapeur du réfrigérant est utilisée dans le deuxième générateur) (Abdenour, 2015).

3. Historique de la machine frigorifique

A la fin du XIX siècle quatre types de machines frigorifiques sont proposés sur le marché et parmi elles, la machine à absorption. Elle est apparue chronologiquement en 3ème position, après la machine à compression - évaporation de vapeur liquéfiable et les machines à détente d'air préalablement comprimé mais avant les machines à évaporation d'eau sous pression réduite qui n'existent presque plus. En 1850 Ch. TELLIER construit une armoire frigorifique directement refroidie par une machine à absorption utilisant l'ammoniac. Aucun brevet n'est pris, faute d'argent. Presque simultanément (1859), Ferdinand CARRE construit une machine basée sur le même principe et, plus fortuné, prend un brevet. Cette machine à glace présentée à l'exposition universelle de LONDRES, en 1862 remporte un vif succès qui ouvre la voie à de nombreuses installations industrielles dans différents pays mais surtout aux ETATS-UNIS. Parmi les causes des premiers succès de la machine à absorption, il faut souligner la supériorité du fluide frigorigène choisit par F. CARRE (l'ammoniac) comparée aux Ethers des machines à compression. En 1860 par ce principe, les machines produisent jusqu'à 100 kg de glace par heure. Pendant la guerre de Sécession (1861-1865) Daniel HOLDEN et Thomas RANKIN développent et perfectionnent la machine "CARRE" (60 tonnes de glace par jour). A partir de 1875 ces machines ne cessent de prendre de l'ampleur. On s'intéresse aussi à l'utilisation de l'énergie thermique perdue, comme énergie motrice (vapeur d'échappement, gaz brûlés, etc...). Des recherches ont lieu sur les mélanges binaires autres que l'ammoniac - eau (étude d'Edmond ALTENKIRCH). Entre deux guerres, c'est l'hégémonie du compresseur. Néanmoins la machine à absorption rencontre un regain de faveur, vers 1930, grâce à la découverte d'un nouveau mélange eau-bromure de lithium ou l'eau est le fluide frigorigène. (Société SERVEL pour des petites et moyennes machines, Société CARRIER pour les grosses unités, 2 millions de frigories par heure) (Carre et al., 1875).

4. Principe de fonctionnement de la machine à absorption

Schématiquement, une installation à absorption liquide comporte les différents éléments représentés sur la figure 4. Elle comprend tout d'abord, comme les machines à compression de vapeur, un ensemble condenseur / détendeur / évaporateur, dans lequel ne

transite que le fluide frigorigène pur. Cet ensemble est connecté à la partie thermique du procédé, chargée de modifier l'état du fluide frigorigène évaporé pour le rendre condensable à la température de l'environnement.

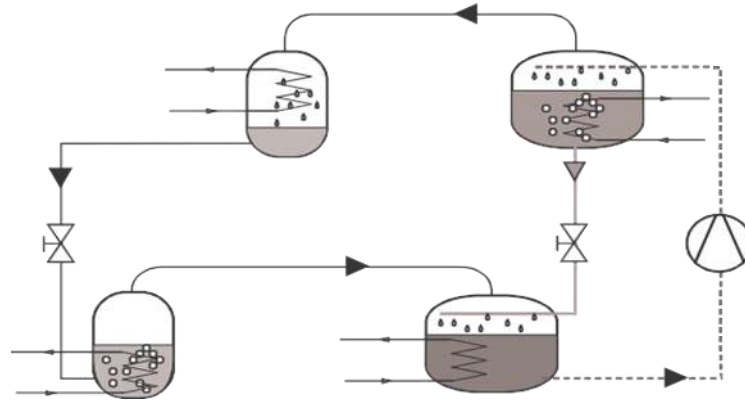


Figure 4 : Représentation schématique d'une machine à absorption simple effet. (Jean, Erwin, 2008)

La base de son fonctionnement réside dans les propriétés des solutions binaires, dont l'équilibre liquide/vapeur est bivariant : à pression constante, la température de saturation évolue avec la composition de la solution liquide. Ainsi, une augmentation de température provoque une concentration de la solution et inversement, son abaissement conduit à une dilution.

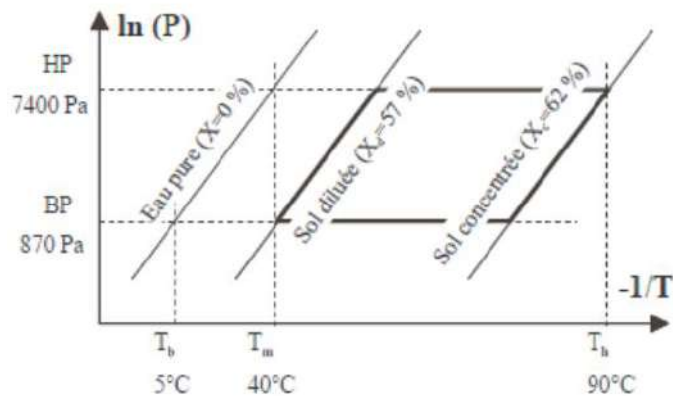


Figure 5 : Représentation d'un exemple de cycle thermodynamique d'une machine à absorption à simple effet dans un diagramme d'Oldham. (Jean, Erwin, 2008)

Le cycle de la solution peut être décrit sur le diagramme de Oldham, qui représente les conditions de saturation P , T , X de la solution liquide (un exemple quantitatif d'un tel cycle est représenté sur la figure 5). Dans ce diagramme, les isotitres ou iso-concentrations sont approximativement des droites. Pour le couple $H_2O/LiBr$, les concentrations sont généralement exprimées par rapport à la teneur en bromure de lithium X_{LiBr} . La droite de

teneur 0 % correspond ainsi à l'équilibre liquide/vapeur de l'eau pure.

Pour mettre en place un cycle à simple effet, les quatre composants actifs suivants sont nécessaires :

- Le condenseur : C'est un composant similaire à celui des machines à compression de vapeur. La température T_m du fluide caloporteur alimentant le condenseur détermine la température de condensation et donc la pression dans l'ensemble désorbeur/condenseur. Le fluide frigorigène se condense en libérant la chaleur de condensation Q_{cond} à la température T_m . Cette transformation comprend une phase de désurchauffe, la condensation proprement dite et éventuellement une étape de sous-refroidissement.
- L'évaporateur : Après avoir quitté le condenseur, le fluide frigorigène liquide subit une expansion à travers le détendeur, se vaporisant ainsi et produisant la puissance frigorifique $Q_{\text{évap}}$. La température de vaporisation, et donc la pression dans l'ensemble évaporateur/absorbeur, est déterminée par la température T_b de la source froide (le milieu à refroidir).
- Le bouilleur ou désorbeur : Dans cet élément, la solution diluée reçoit une quantité de chaleur Q_{des} à une température T_h , provoquant la désorption d'une partie du fluide frigorigène dissous dans la solution. Le désorbeur génère ainsi de la vapeur de frigorigène et une solution concentrée.
- L'absorbeur : La vapeur provenant de l'évaporateur entre en contact avec la solution concentrée issue du désorbeur. Elle est absorbée par cette solution, qui s'enrichit en fluide frigorigène. La chaleur Q_{abs} libérée lors de cette réaction exothermique est évacuée par un fluide caloporteur à la température T_m . À la sortie de l'absorbeur, on obtient une solution diluée.

La différence de pression entre l'ensemble absorbeur / évaporateur (B.P.) et désorbeur / condenseur (H.P.) nécessite en outre:

- la présence de deux détendeurs, sur les circuits fluide frigorigène et solution concentrée, la présence d'une pompe sur le circuit de la solution diluée
- Les températures des sources T_m (environnement) et T_b (production de froid) fixent les deux pressions haute et basse. Ces deux pressions correspondent aux pressions de vapeur saturante de l'eau (isotitre $X_{\text{LiBr}} = 0$) aux températures T_m et T_b .
- Le titre X_c de la solution concentrée en sortie de désorbeur est donné par l'intersection de l'isotherme T_h et de l'isobare P_h . D'une manière analogue, le titre X_d de la solution diluée en sortie d'absorbeur correspond à l'intersection de l'isotherme T_m et de l'isobare P_b .

- L'absorbeur reçoit la solution concentrée provenant du désorbeur, après que celle-ci ait été détendue dans le détendeur (Thermodynamique & Rabat, 2018).

5. Les couples utilisés dans les machines

Le choix des couples absorbant/réfrigèrent pour les machines à absorption dépend de plusieurs critères (thermodynamiques, thermiques, chimique, technico-économiques) parmi lesquels on peut citer:

5.1. H₂O / NH₃

L'utilisation de la paire de fluides de travail NH₃/H₂O est courante dans les thermo-transformateurs de chaleur à absorption (AHT) et présente une corrosivité moindre par rapport à la paire H₂O/LiBr (E. & I., 2001). Une étude menée par Kurem et Horuz a comparé l'utilisation de NH₃/H₂O et H₂O/LiBr comme fluides de travail dans un SAHT, démontrant que le système H₂O/LiBr avait légèrement meilleur coefficient de performance (COP) dans toutes les conditions testées, mais nécessitait également un débit de réfrigérant plus élevé. Les chercheurs ont souligné que pour que le cycle NH₃/H₂O atteigne les mêmes performances que la paire H₂O/LiBr, une architecture plus complexe (et donc plus coûteuse) de l'AHT serait nécessaire. (Zineb et Ahmed, 2005)

Les améliorations envisageables incluraient la récupération de chaleur dans le générateur avec un glissement de température, ainsi que l'utilisation d'une colonne de distillation à la place d'un bouilleur (générateur) pour séparer les traces d'eau de l'ammoniac.

Il convient de noter que l'application de NH₃-H₂O est moins adaptée aux applications de récupération de chaleur à hautes températures en raison des pressions très élevées requises (la pression de saturation de l'ammoniac à 90°C est de 51 bars). Par conséquent, bien que plusieurs analyses des AHT aient été réalisées en considérant cette paire de fluides de travail, elle ne présente pas les caractéristiques nécessaires pour remplacer efficacement la paire H₂O-LiBr (Wakim, 2018).

5.2. LiBr / H₂O

La paire LiBr / H₂O est la combinaison de fluides de travail la plus largement utilisée dans les AHTs du commerce. Ceci est dû à un certain nombre d'avantages, tels que l'enthalpie d'évaporation élevée de l'eau, les bonnes capacités de transfert de masse et de chaleur, la faible toxicité et le fait qu'aucune colonne de distillation n'est nécessaire dans le cycle puisque le LiBr n'est pas volatil et il est facile d'obtenir de la vapeur d'eau pure. Cette paire a également plusieurs inconvénients, tels que la forte corrosivité de la solution saline, la solubilité limitée du LiBr dans l'eau, et le risque de cristallisation du LiBr à une température dépassant 120°C. Ainsi, beaucoup d'efforts ont été consacrés à la recherche de solutions

alternatives qui aient les mêmes propriétés thermodynamiques que H₂O/LiBr tout en éliminant certains de ses inconvénients (Wakim, 2018).

6. Analyse thermodynamique des machines à absorption

Le diagramme d'Oldham est le plus utilisé et le plus pratique pour une étude du cycle de la solution. Il donne la teneur de la solution en soluté en fonction de la température et de la pression. C'est un diagramme ($\ln(P), -1/T$), paramétré en teneur pondérale. La figure 6 présente un tel diagramme relatif au couple H₂O/LiBr.

Dans ce diagramme, les isotitres sont sensiblement des droites. La droite de teneur 0 % correspond à l'équilibre liquide/vapeur de l'eau pure. La richesse de l'isotitre est définie par rapport à la teneur en bromure de lithium (Los, n.d.2001).

Pressions de fonctionnement:

Les températures des sources T_m (environnement) et T_b (production de froid) fixent les deux pressions P_h et P_b . Ces deux pressions correspondent aux pressions de vapeur saturante de l'eau (isotitre $X_{LiBr} = 0$) aux températures T_m (point 1) et T_b (point 3).

Variation du titre au cours du cycle:

Le titre X_c de la solution concentrée (pauvre) en sortie de désorbeur est donné par l'intersection de l'isotherme T_h et de l'isobare P_h (point 6). D'une manière analogue, le titre X_d de la solution diluée (riche) en sortie d'absorbeur correspond à l'intersection de l'isotherme T_m et de l'isobare P_b (point 4).

Titre et température de la solution à l'entrée de l'absorbeur:

L'absorbeur reçoit la solution concentrée (pauvre) provenant du désorbeur, après que celle-ci ait été détendue dans le détendeur (6-8). La détente implique une chute de température due à une vaporisation partielle de la solution. L'absorbeur reçoit donc un mélange de solution liquide et de vapeur (8), dont il n'est pas possible, à l'aide de ce diagramme de préciser ni la température, ni la masse relative des deux phases. A l'entrée de l'absorbeur, ce mélange est donc tout d'abord refroidi, d'une part par mélange avec la vapeur froide arrivant de l'évaporateur, d'autre part, directement par le fluide caloporteur. Ce refroidissement entraîne tout d'abord une re-absorption de la vapeur produite par la détente, puis, l'absorption de vapeur provenant de l'évaporateur. Le processus d'absorption commencera au point δ_{sat} , défini par l'intersection de l'isotitre x_c et de l'isobare P_b (Los, n.d.).

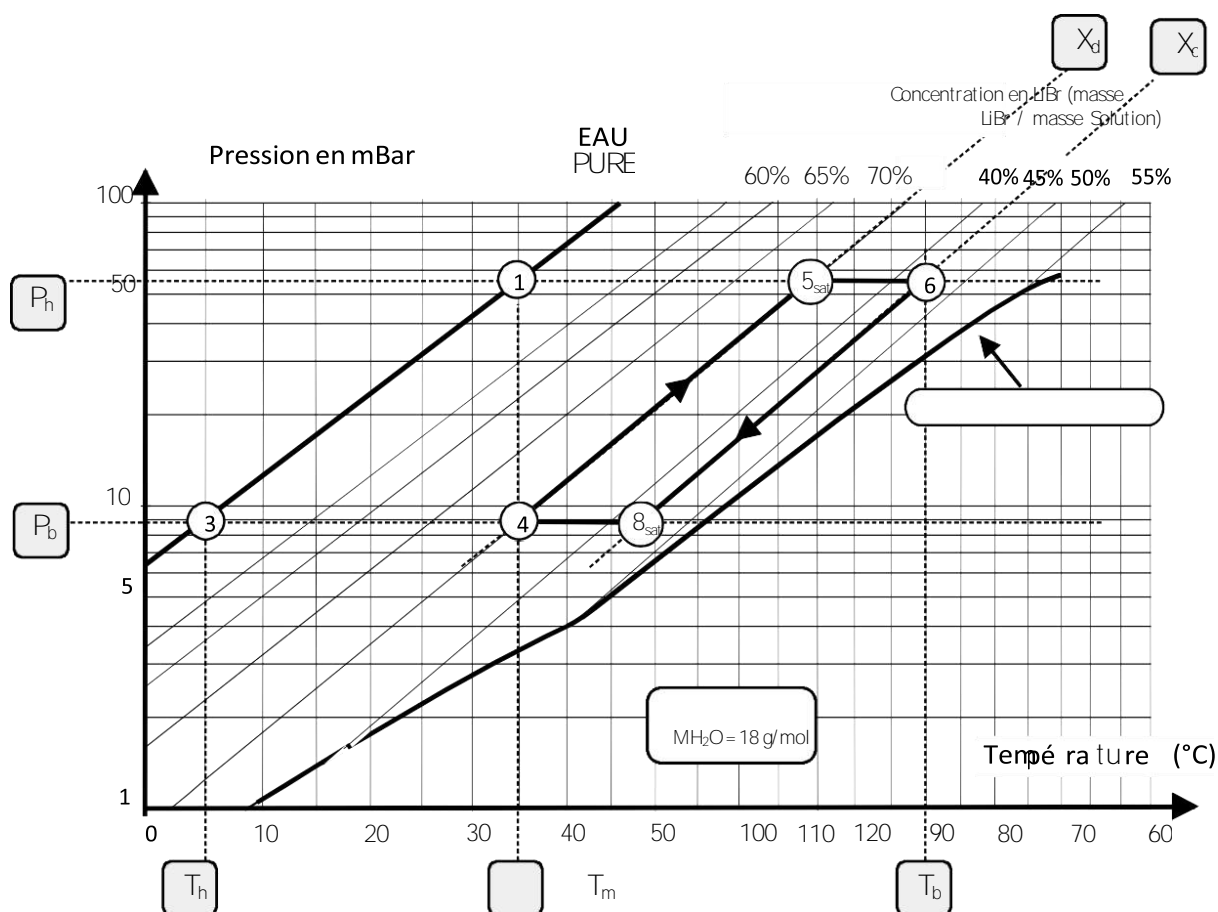


Figure 6 : Représentation des points caractéristiques du cycle à absorption sur un diagramme d'Oldham, couple H₂O/LiBr. (Zineb et Ahmed, 2005)

Titre et température de la solution à l'entrée du désorbeur:

Le désorbeur reçoit la solution diluée (riche) issue de l'absorbeur, après que celle-ci ait traversé la pompe (4-4). Ce liquide sous-refroidi, ne peut pas être représenté sur le diagramme de Oldham, où ne figurent que des états d'équilibre liquide/vapeur. Si la compression est supposée isotherme, le titre et la température sont ici connus et restent identiques au titre et à la température du point 4. A son entrée dans le désorbeur, le liquide sera donc tout d'abord réchauffé jusqu'à la température T_{5sat} , donnée par l'intersection de l'isotitre X_d et de l'isobare P_h . La désorption commencera alors au point 5_{sat} ainsi défini.

Si le diagramme de Oldham permet d'avoir une bonne représentation de l'installation, il ne permet ni l'étude énergétique, ni le dimensionnement de la machine. Ces objectifs requièrent l'utilisation du diagramme de Merkel (concentration, enthalpie, voir figure 6). Il existe aujourd'hui aussi les logiciels de calcul, qui, à partir des équations d'état, donnent les mêmes renseignements mais de façon plus rapide et plus fiable.

Le **diagramme de Merkel** : (figure 6) permet une étude complète de la machine à absorption, car, en plus des informations données par le diagramme de Oldham, il renseigne, ce qui est fondamental pour les calculs, sur l'enthalpie de la solution liquide (ou absorbant) et de la vapeur du soluté (ou absorbat). C'est un diagramme X, h paramétré en pression et température pour la solution, en pression pour la vapeur. Il permet de connaître la teneur du mélange vapeur en équilibre avec la solution ainsi que les enthalpies de chaque point. On prêtera attention aux conventions choisies dans la représentation de ces diagrammes. On remarquera en particulier que celui de la figure 7 adopte la teneur en eau comme représentation de la concentration (Los, n.d.).

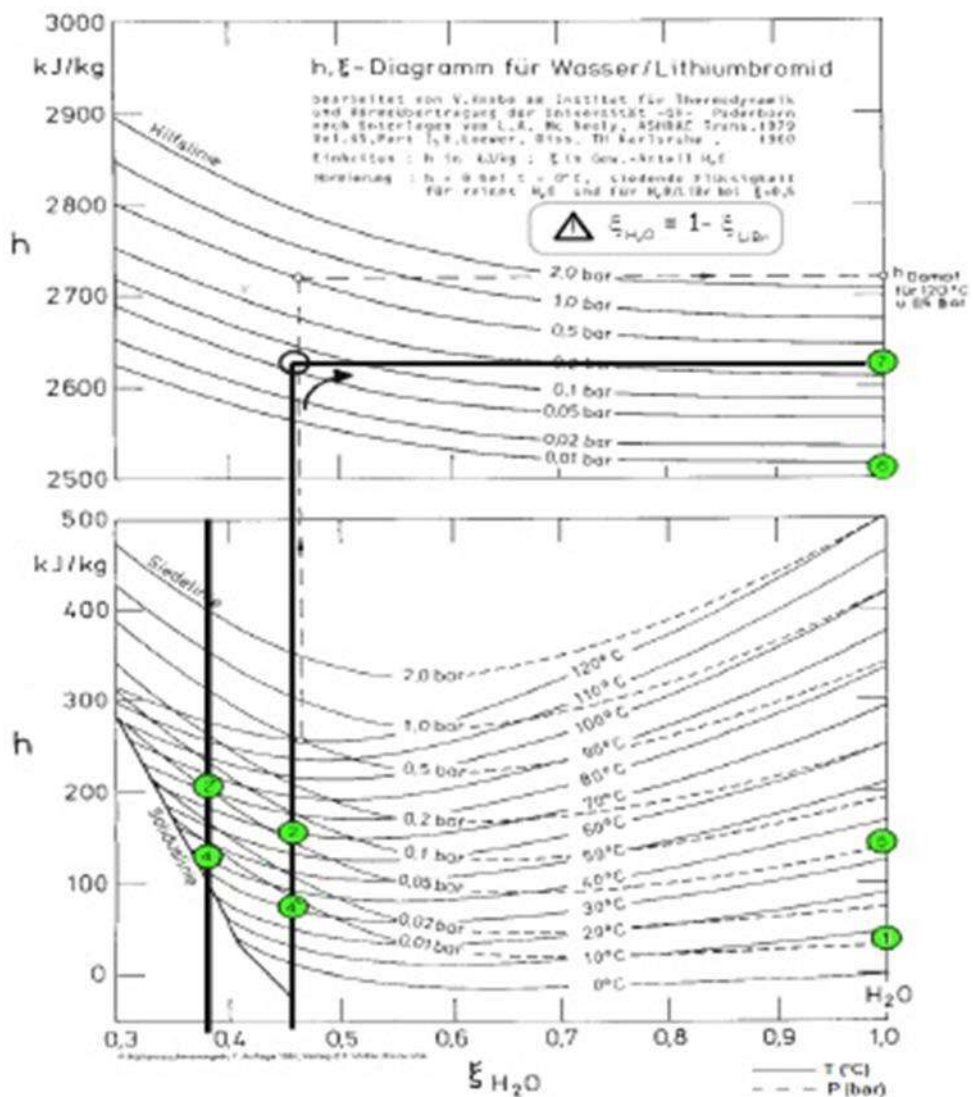


Figure 7 : Diagramme de Merkel du couple H2O/LiBr (Los, n.d.2001).

7. Conclusion

Les machines à absorption jouent un rôle crucial dans la transition énergétique en réduisant efficacement les émissions de chaleur résiduelle à basse température (inférieure à 100°C), telles que les rejets industriels de chaleur, et en exploitant les sources d'énergie renouvelable telles que le solaire et la géothermie. Ces machines permettent de valoriser cette chaleur pour diverses applications industrielles.

Actuellement, les recherches se concentrent sur les applications potentielles des machines à absorption, les fluides de travail appropriés et l'évaluation de leurs performances. Les machines à absorption commercialisées utilisent principalement deux paires de fluides de travail : l'ammoniac-eau pour la réfrigération en dessous de 0°C, et l'eau-bromure de lithium pour le refroidissement au-dessus de 0°C. Cependant, ces paires de fluides présentent certains inconvénients, tels que la corrosion, la cristallisation, les pressions d'opération sous-atmosphériques et la taille importante des équipements avec la solution H₂O-LiBr, ainsi que des problèmes de toxicité et de haute pression avec la paire ammoniac-eau.

Il est donc nécessaire de trouver des alternatives pour remplacer ces paires de fluides. Les fluides organiques se présentent comme une option prometteuse. Cependant, il convient de noter que les liquides ioniques pourraient également constituer une solution, bien que les données sur leur équilibre liquide-vapeur et leurs propriétés thermo physiques soient encore peu disponibles. En ce qui concerne les fluides organiques, ils n'ont pas reçu l'attention nécessaire en termes d'études théoriques et expérimentales, malgré leur grand nombre. Ils présentent pourtant un potentiel important pour remplacer les fluides de travail utilisés dans les machines à absorption.

CHAPITRE II

***Notions sur la capacité de
stockage thermique***

1. Introduction :

La notion de stockage thermique revêt une importance capitale dans les domaines de l'énergie et de la gestion des ressources renouvelables. Elle permet de capturer l'énergie solaire durant les périodes ensoleillées et de la restituer ultérieurement, selon les besoins. Il existe trois approches distinctes en matière de stockage thermique : le stockage thermo-chimique, le stockage thermique sensible et le stockage thermique latent. La capacité de stockage thermique joue un rôle essentiel dans l'exploitation optimale de l'énergie solaire et d'autres sources d'énergie renouvelable. Grâce à l'utilisation de matériaux et de systèmes appropriés, il est possible d'entreposer et de libérer la chaleur de manière efficace, durable et respectueuse de l'environnement.

2. Description des différents types de systèmes de stockage

Les systèmes de stockage d'énergie sont des éléments essentiels dans les systèmes énergétiques et notamment ceux qui se situent dans les sites isolés. Lorsque les sources d'énergies produisent plus que la demande, l'excédent d'énergie sera stocké dans les systèmes de stockage. L'énergie stockée sera exploitée lorsque les sources d'énergie sont hors service ou en état de production insuffisante, il existe différents types de système de stockage (batteries, supercondensateurs, piles à combustible et volants d'inertie).

3. Le stockage sous forme d'énergie cinétique

Le principe du volant d'inertie permet de stocker de l'énergie sous forme cinétique. Il était utilisé par les potiers mésopotamiens il y a des milliers d'années. Le stockage consiste à entraîner une masse (disque, anneau ou tube) à haute vitesse. L'énergie stockée est par la suite récupérée en freinant la masse en mouvement lors du déstockage. Ce genre de système est historiquement utilisé pour la régulation des moteurs thermiques (de locomotive à vapeur par exemple). Toujours dans le domaine du transport, des volants d'inertie permettent de stocker l'énergie lors du freinage de véhicules pour la redistribuer lors du démarrage. Il est ainsi possible de stocker directement de l'énergie mécanique ou de stocker de l'électricité à l'aide d'un moteur électrique particulier qui est utilisé comme génératrice lors du déstockage. La capacité mondiale installée est estimée à un peu moins de 25 MWe pour le stockage électrique (Pau et al., 2015).

4. Le stockage sous forme d'énergie potentielle

Les stations de pompage permettent de stocker de l'électricité sous forme d'énergie potentielle de l'eau. Lors du stockage l'eau est pompée depuis un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur, augmentant ainsi son énergie potentielle. Elle revient ensuite à son point

de départ à travers une turbine pour produire de l'électricité. Ce mode de stockage de l'électricité est le plus répandu avec pas moins de 127 GWe de capacité installée dans le monde, soit environ 99 % de la capacité totale mondiale de stockage électrique (Pau et al., 2015).

5. Stockage de l'énergie électrique :

Le système électrique est une configuration complexe d'unités de production d'électricité, de transmission et d'utilisateurs d'énergie créant une offre et une demande au sein du système. Pour que le système reste stable, l'équilibre doit exister entre l'offre et la demande d'électricité (Ibrahim et al., 2008). Cependant, la demande d'électricité varie constamment, à la fois d'un jour à l'autre et d'une saison à l'autre, en fonction des besoins des utilisateurs en matière de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, etc. (Denholm et al., 2010). L'intégration dans le réseau d'énergies renouvelables dont la production est variable et imprévisible, comme l'énergie éolienne et solaire, ajoute encore une dimension d'incertitude qui rend encore plus difficile le maintien de l'équilibre (Ibrahim et al., 2008). La quantité d'électricité provenant de sources d'énergie renouvelables dans le réseau a augmenté, ce qui constitue une étape importante vers un système énergétique plus durable et un moyen de réduire la dépendance globale à l'égard des combustibles fossiles et, partant, les émissions de gaz à effet de serre (Denholm et al., 2010, Salvini et al., 2017). Pour augmenter les chances d'une meilleure intégration, il faut s'attaquer au manque de fiabilité des sources d'énergie renouvelables afin de faciliter leur intégration dans le réseau. Le stockage de l'énergie électrique pourrait être une solution puisqu'il pourrait permettre de réguler l'approvisionnement en électricité à partir de sources d'énergie renouvelables pour répondre à l'évolution de la demande et ainsi maintenir l'équilibre (Ibrahim et al., 2008). Le stockage de l'énergie électrique pourrait également être un moyen de renforcer la fiabilité du réseau électrique existant et de stimuler l'intégration des énergies renouvelables (Denholm et al., 2010).

6. Stockage à base d'eau

L'eau est considérée comme un matériau favorable au stockage de l'énergie en raison de sa chaleur spécifique élevée (par rapport à d'autres supports de stockage de chaleur sensible) et de son taux de capacité élevé lorsqu'elle est chargée et déchargée. Les systèmes de stockage à base d'eau utilisent littéralement l'eau comme moyen de stockage ou fluide caloporteur pour stocker/transférer la chaleur. Ils peuvent être classés en deux catégories : les systèmes de stockage dans un réservoir d'eau et les systèmes de stockage dans un aquifère. Les systèmes de stockage dans un réservoir ou une fosse stockent l'eau dans une structure

artificielle, tandis que le stockage dans un aquifère utilise de l'eau naturelle provenant directement de la couche souterraine (Xu et al., 2014).

7. Le stockage thermique de l'énergie solaire

Le stockage d'énergie thermique est défini comme étant le stockage temporaire d'énergie par chauffage ou refroidissement de sorte que l'énergie stockée peut être utilisée ultérieurement pour la production d'électricité, une application de chauffage ou de refroidissement. Selon l'IRENA, le stockage de thermique offre la flexibilité essentielle pour intégrer des parts élevées d'énergie solaire et éolienne dans les nouveaux systèmes énergétiques. En effet, le stockage de l'énergie peut aider à fournir une énergie constante lors de l'intégration de sources d'énergie renouvelables avec une offre fluctuante. L'inconvénient majeur des énergies renouvelables et principalement l'énergie solaire est qu'il s'agit d'une source intermittente (nuit, soleil occulté par les nuages) et qui est parfois en inadéquation avec les besoins d'un point de vue spatial, temporel, en puissance ou en température. La solution est donc de stocker la chaleur produite par l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques au moment et à l'endroit où ceux-ci se manifestent. Une fois que l'énergie thermique est collectée par les capteurs solaires (plans, paraboliques, hyperboliques, miroirs) elle doit être stockée efficacement pour être utilisée ultérieurement. C'est pourquoi, il est d'une grande importance de concevoir un système de stockage d'énergie efficace. Il existe plusieurs paramètres qui influent sur l'efficacité des systèmes de stockage de chaleur. Les principaux aspects qui doivent être pris en compte lors de la conception d'un système de stockage sont les propriétés techniques du système de stockage, et sa rentabilité (Coeytaux, 1978).

8. Classification des systèmes de stockage d'énergie thermique :

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées dans diverses catégories selon différents critères (figure (8)). Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid ». Dans le cas où le critère est la durée de stockage deux classes sont considérées, « le stockage à long terme » et « le stockage à court terme ». D'autre part, si le critère est l'état du matériau de stockage, il existe quatre principaux types : « stockage par chaleur sensible », « stockage par chaleur latente », « stockage par chaleur thermochimique » et « stockage par sorption ». Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres catégories: actifs ou passifs. Le terme de stockage actif est utilisé dans le cas où le matériau de stockage circule dans le système. À l'opposé, dans le cas d'un système de stockage d'énergie thermique passif (aussi appelé régénérateur), le matériau de stockage ne

circule pas dans le procédé. L'énergie thermique est transportée via un fluide caloporteur, et est transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur. La structure de l'échangeur de chaleur est installée au sein du matériau de stockage (Academique, 2019).

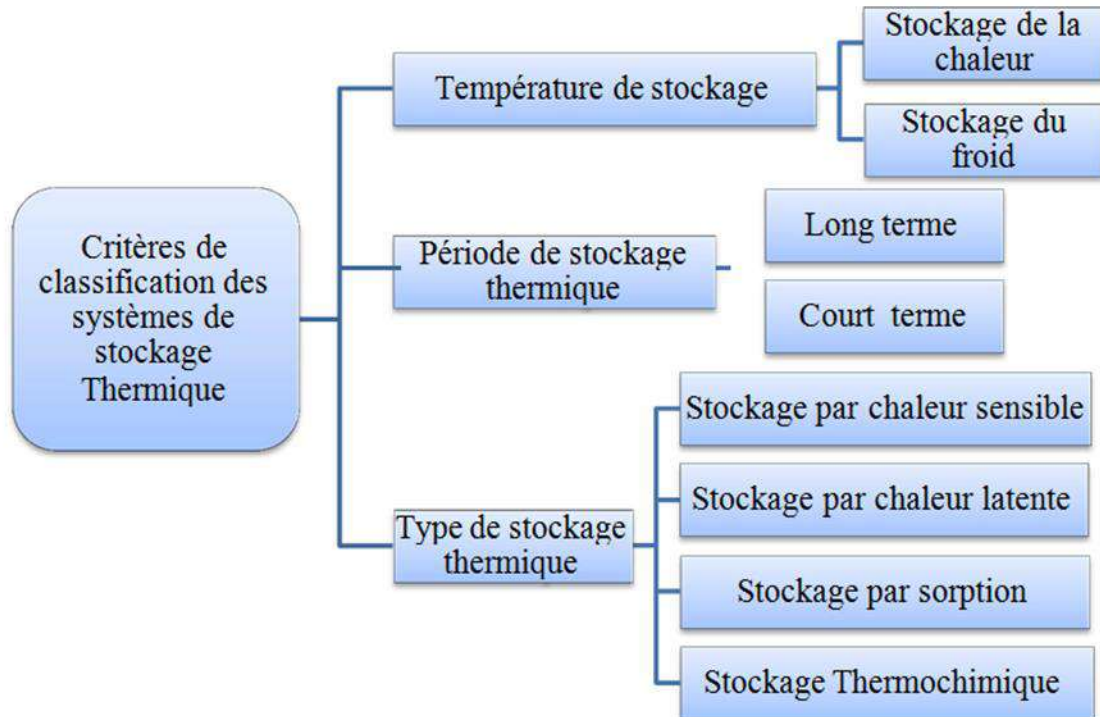


Figure 8 : Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique. (Pau et al., 2015).

9. Les types de systèmes de stockage de l'énergie thermique

Il existe trois types de systèmes de stockage de l'énergie thermique : le stockage de la chaleur sensible, le stockage de la chaleur latente et le stockage thermochimique. La figure 9 montre une représentation schématique des nœuds du TES plus (Cabeza et al., 2015).

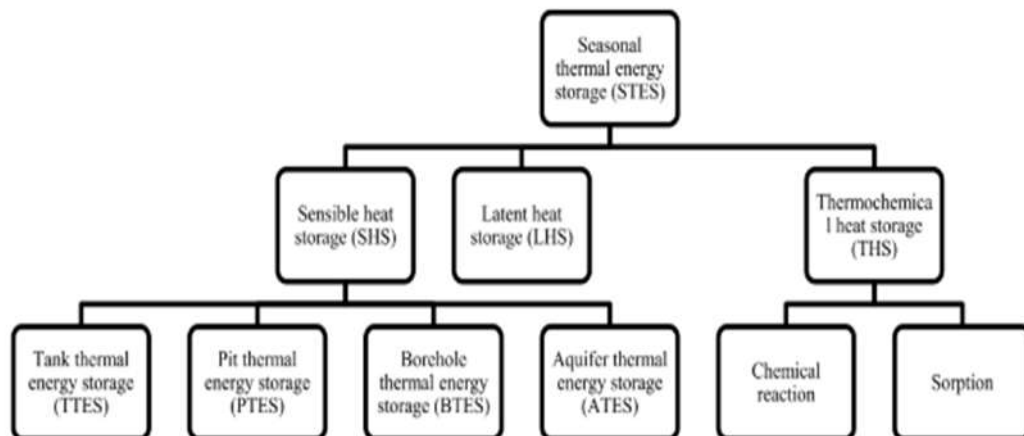


Figure 9 : une représentation schématique des nœuds du TES (Crespo, Alicia; Fernández, César; de Gracia, Alvaro; Frazzica, 2022).

9.1. Stockage de chaleur sensible

Le stockage de la chaleur sensible est la méthode de stockage thermique la plus courante, qui a été utilisée dans plusieurs applications avec de l'eau, de la pierre ou de la brique comme matériau de stockage. La méthode consiste à transférer de la chaleur au support de stockage qui augmentera sa température et stockera cette chaleur. Le potentiel de cette méthode dépend principalement de la capacité thermique du matériau de stockage, de la masse et du gradient thermique auquel le stockage est exposé (Navarro et al., 2016). Malgré la large application du stockage de la chaleur sensible, il souffre d'une faible capacité de stockage et d'une forte perte de chaleur sensible, il souffre d'une faible capacité de stockage et d'une perte de chaleur sensible élevée, ce qui nécessite un volume de système important et une isolation pour le stockage à long terme (Mehari et al., 2020b). La chaleur latente est obtenue lors d'un changement d'état de phase d'un matériau. Pendant le changement de phase solide-liquide, la température reste constante et le matériau peut emmagasiner de grandes quantités de chaleur, qui est le processus le plus utilisé en raison de ses conditions facilement contrôlables, la température reste constante et le matériau peut emmagasiner de grandes quantités de chaleur. Dans ce cas, les applications de stockage de la chaleur latente utilisent les processus de fusion et de solidification pour stocker et libérer la chaleur dans des matériaux à changement de phase (MCP). La chaleur sensible se traduit toujours par une augmentation ou une diminution de la température du matériau. Tous les matériaux ont la capacité d'absorber et de stocker la chaleur du fait qu'ils ont une masse m et une capacité thermique spécifique c_p à pression constante. La capacité thermique augmente avec la température. La théorie sous-jacente est décrite par le modèle de Debye. Pour une différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$, cette chaleur (ou enthalpie) s'élève à Q_{sensible} (équation ci-dessous) (Singh et al., 2010)(Navarro et al., 2016).

$$Q_{\text{sensible}} = mc_p(T_2 - T_1) \quad (\text{II.1})$$

9.2. Stockage de chaleur latente :

Dans le stockage de la chaleur latente, l'énergie thermique est stockée via le processus de changement de phase à une température fixe, dans lequel l'enthalpie de fusion, de vaporisation et de sublimation est stockée lorsqu'un matériau change de phase, passant respectivement de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide à l'état gazeux et de l'état solide à l'état gazeux. Même si l'enthalpie de fusion est plus faible que l'autre, le changement de phase solide à liquide est préférable car ce processus entraîne généralement un faible changement de volume.

En outre, une large gamme de températures de fusion peut être obtenue à partir de différents matériaux à changement de phase, ce qui rend le stockage de la chaleur latente adapté au stockage de l'énergie thermique, compte tenu des différentes conditions de fonctionnement.

À cet égard, un grand nombre de matériaux ont été utilisés dans le changement de phase solide-liquide, notamment la glace, les sels hydratés, les cires de paraffine, les acides gras et les eutectiques de composés organiques et non organiques (Mehari et al., 2020a).

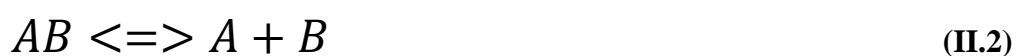
9.3. Stockage de la chaleur chimique :

Les systèmes de stockage d'énergie chimique utilisent le changement d'enthalpie d'une réaction chimique réversible. L'intérêt pour ces systèmes est principalement motivé par la possibilité de stocker l'énergie à des densités plus élevées que les autres types de SET. Il est également possible de stocker les réactifs et le produit à la température ambiante pour éviter les pertes thermiques.

Par rapport aux systèmes de chaleur sensible et latente, le stockage thermochimique peut avoir différents niveaux de température pour le processus de charge et de décharge. Il est donc possible d'améliorer et de réduire la chaleur et de fournir de la chaleur à un niveau de température approprié. Les systèmes sans capacité de stockage sont connus sous le nom de transformateurs de chaleur et de pompes à chaleur chimiques. Les transformateurs de chaleur absorbent la chaleur à un niveau de température bas et fournissent de la chaleur à un niveau de température élevé. Les pompes à chaleur chimiques absorbent la chaleur à un niveau de température plus élevé et fournissent de la chaleur à un niveau de température plus bas (Garg 1985). Bien que ces systèmes ne visent pas le stockage de la chaleur, il existe des liens entre les développements dans les domaines de la transformation de la chaleur/des pompes à chaleur chimiques et du stockage thermochimique.

L'énergie est stockée sous forme de composés chimiques A et B créés par une réaction endothermique et elle est récupérée en recombinaison des composés dans une réaction exothermique (équation ci-dessous). À des températures suffisamment élevées, les produits A et B sont séparés dans l'espace.

$$\Delta H_r$$



La chaleur stockée et libérée est équivalente à la chaleur (enthalpie) de réaction. L'enthalpie de réaction ΔH_r est généralement beaucoup plus importante que l'enthalpie de transition dans le stockage de la chaleur latente ou de la chaleur sensible sur une plage de

température raisonnable. Par conséquent, la densité de stockage, basée sur la masse ou le volume solide, est beaucoup plus importante pour les matériaux de stockage thermochimique que pour les matériaux de stockage de chaleur latente ou sensible (Wentworth 1976, Mar 1980, Sizmann 1980). De nombreux concepts de stockage d'énergie thermochimique en sont à un stade de développement moins avancé que les systèmes de chaleur sensible et latente. Les systèmes de sorption à basse température constituent une exception. Le potentiel du stockage thermochimique a été identifié très tôt dans l'évolution de la technologie CSP (Ervin 1977, Williams 1978, Brown 1992), mais ces systèmes sont encore à un stade précoce et nécessitent davantage de recherche et de développement. Un grand nombre de groupes étudient activement les processus chimiques basés sur l'énergie solaire. Ces procédés visent à produire des carburants et des produits chimiques utiles. D'une manière générale, ces approches constituent également un système de stockage de l'énergie. Dans le cadre de ce chapitre, les procédés chimiques basés sur l'énergie solaire ne sont pas examinés plus en détail.

Les systèmes de stockage thermochimique peuvent être classés en deux grandes catégories. Les systèmes de type ouvert échangent des gaz avec l'environnement.

Pendant le processus de chargement, les gaz sont libérés dans l'environnement. Au cours du processus de décharge, un gaz provenant de l'environnement est utilisé. Ces systèmes peuvent donc fonctionner sans compression ni stockage de gaz, ce qui simplifie leur conception. Les gaz comprennent l'oxygène, l'azote, la vapeur d'eau et éventuellement le dioxyde de carbone. Les systèmes ouverts peuvent introduire des substances indésirables provenant de l'environnement.

Les impuretés peuvent être des poussières, du dioxyde de soufre, du dioxyde de carbone et des composés organiques. Ces substances peuvent détériorer les performances du système. La conception des systèmes avec des filtres permet d'éviter de telles difficultés. Le stockage de la phase gazeuse non pressurisée dans un système de type fermé n'est généralement pas possible en raison de l'importance inacceptable du volume de gaz. En général, les systèmes fermés compriment ou condensent le gaz. Le gaz ou le liquide sous pression peut ensuite être stocké de manière pratique. Le gaz peut également être réabsorbé par une seconde réaction chimique (Sizmann 1980). Cette discussion indique qu'il faut tenir compte de la performance globale du système. En d'autres termes, la prise en compte d'une seule réaction chimique plutôt que du système dans son ensemble peut être trompeuse. Un processus de sorption peut être considéré comme un système de réaction chimique basé sur des liaisons chimiques plus faibles que les liaisons covalentes rencontrées dans d'autres systèmes. Dans un système de stockage de chaleur par sorption, l'absorbant est chauffé

pendant le processus de charge et la vapeur est désorbée de l'absorbant. Pendant la décharge, la vapeur à une température plus basse est adsorbée (sorbant solide) ou absorbée (sorbant liquide) et la chaleur à un niveau de température plus élevé peut être libérée. Dans ce qui suit, les systèmes de stockage thermochimique sont classés en fonction des trois phases physiques des réactions réversibles : solide, liquide et gazeuse (figure 10), réactions solides, liquides et gazeuses. Au moment de la rédaction du présent document, les réactions solide-gaz sont le plus souvent prises en compte. Les réactions liquide-gaz et gaz-gaz ont également été examinées (Bauer et al., 2012).

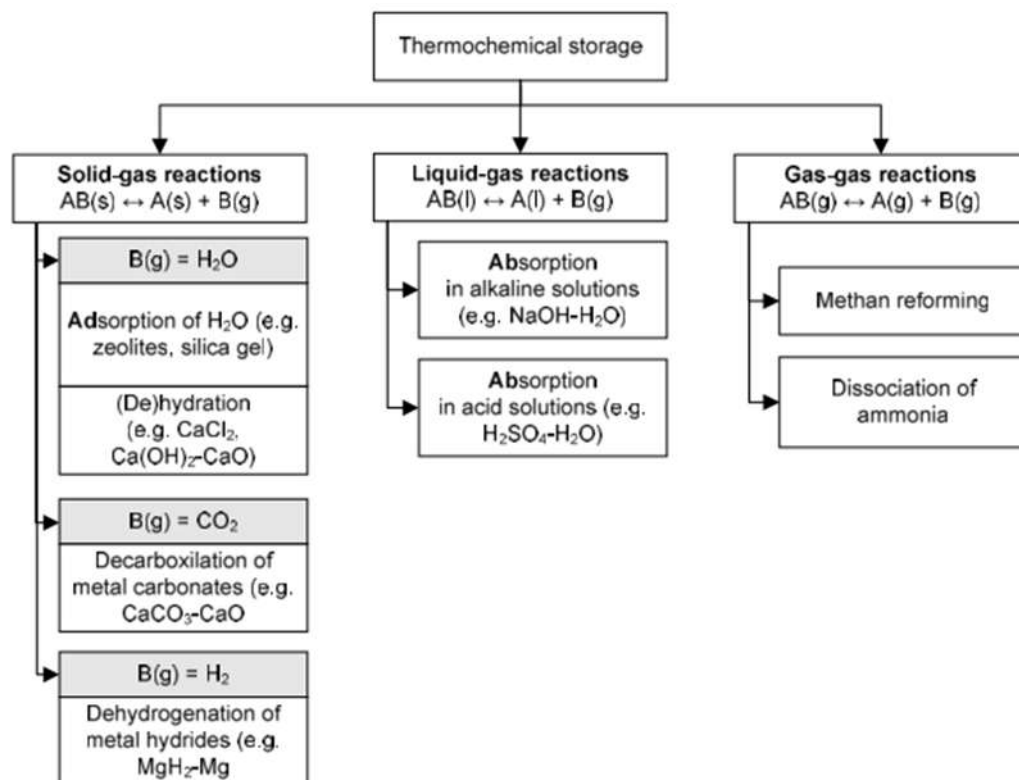


Figure 10 : Classification de stockage de l'énergie thermique selon le type de réaction. (Garg 1985).

10. Les solutions de stockage thermique

Les solutions de stockage thermique se différencient en fonction de leur niveau de température utile (stockage à haute, moyenne et basse température), de leur durée de stockage (stockage de courte durée ou saisonnier) et du principe thermodynamique régissant le stockage (stockage par chaleur sensible, stockage par chaleur latente et stockage thermo-chimique). La figure 11 présente une vue d'ensemble de ces modes de stockage ainsi que des principaux matériaux de stockage utilisés.

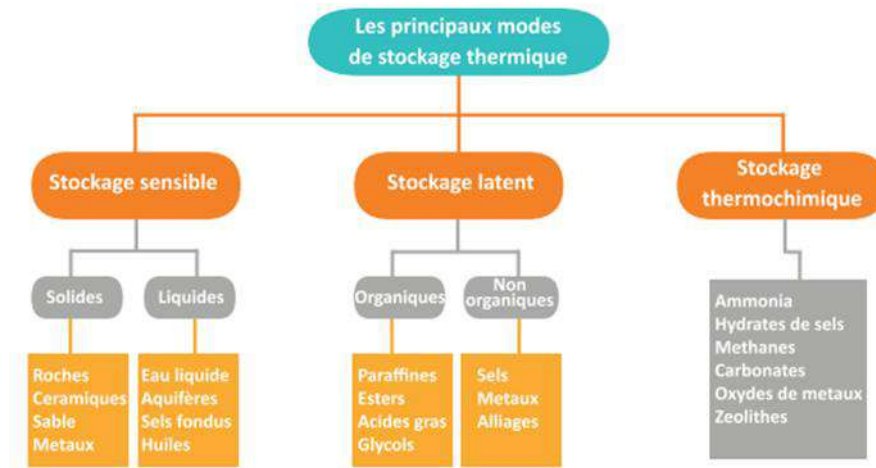


Figure 11 : Classification des différents types de stockage thermique (Garg 1985).

11. Comparaison des solutions de stockage de l'énergie thermique sensible et latente :

Les systèmes de stockage de chaleur sensible sont plus simples à concevoir que les systèmes de stockage de chaleur latente ou thermochimique. Ils présentent toutefois l'inconvénient d'être plus volumineux et de ne pas pouvoir stocker ou fournir de l'énergie à une température constante.

Le stockage de la chaleur sensible entraîne des pertes d'énergie pendant la durée du stockage. Ces pertes sont fonction du temps de stockage, de la température de stockage, du volume de stockage, de la géométrie du stockage et des propriétés thermiques du fluide de stockage.

Tous les concepts de stockage de chaleur sensible ont un défi fondamental en commun. Lorsque de la chaleur ou du froid est chargé ou déchargé du stockage, il y a des différences de température dans les différentes parties du volume de stockage. Il est donc de la plus haute importance que le milieu de stockage puisse maintenir une couche structurée, par exemple avec l'eau la plus chaude en haut et la plus froide en bas. Le coût de la solution de stockage de la chaleur sensible dépend principalement des caractéristiques du matériau de stockage. Il est très courant d'utiliser des matériaux très bon marché ; pour les liquides tels que l'eau, les huiles et certains sels fondus inorganiques et les solides tels que les roches, les sables, les cailloux et les matériaux réfractaires en tant que moyen de stockage. En raison de la chaleur spécifique élevée de l'eau et de la possibilité d'obtenir des taux de capacité élevés pour la charge et la décharge, cette technologie semble être la plus favorable d'un point de vue thermodynamique.

Le principal problème des systèmes de stockage d'eau est la corrosion pendant de longues périodes de fonctionnement. Un autre inconvénient des systèmes de stockage de l'eau est que le volume du stockage peut être très important pour les grandes capacités thermiques et que l'ensemble du système devient donc très lourd. Les grandes unités de stockage posent également un problème de stratification, ce qui nécessite des contrôles. Le stockage dans la roche ne pose pas de problème de corrosion ou de formation de tartre, mais le volume du système peut augmenter, ce qui entraîne une hausse des coûts. D'autre part, l'utilisation de systèmes de stockage à changement de phase permet d'éliminer les grands volumes requis par les deux autres types de stockage. En raison de l'interaction entre le matériau de stockage et le conteneur, le matériau de stockage perd ses caractéristiques de stockage d'énergie après un certain temps. Les systèmes de stockage dans la roche ont des périodes d'amortissement plus longues parce qu'ils n'ont pas de problèmes de corrosion et de déformation, mais comme leurs volumes sont importants, leurs coûts initiaux totaux sont très élevés. Les matériaux à changement de phase sont soit conditionnés dans des conteneurs spécialisés tels que des tubes, des panneaux peu profonds, des sacs en plastique, etc., soit contenus dans des éléments de construction conventionnels (panneaux muraux, plafonds), soit encapsulés sous la forme d'un système de stockage autonome grains. Étant donné que les substances chimiques contenues dans certains matériaux à changement de phase se séparent et se stratifient à l'état liquide, les matériaux à changement de phase ne se sont pas toujours resolidifiés correctement. Lorsque les températures baissent, ils ne se solidifient pas complètement, ce qui réduit leur capacité à stocker la chaleur latente. C'est supposé que les conteneurs de systèmes à changement de phase étaient fabriqués en plastique et que la déformation du matériau commencerait au bout de cinq ans. Il a été constaté que le type le plus économique est le système de stockage d'eau. D'autre part, le système de stockage de l'eau occupe un volume 80 fois supérieur au volume occupé par le système à changement de phase et sa période d'amortissement est quatre fois plus longue que celle des systèmes à changement de phase. Les systèmes à changement de phase sont les plus coûteux, mais aussi les plus compacts, et leur durée d'utilisation est la plus courte en raison des problèmes de déformation et de dégradation des matériaux. En raison de leur compacité, leur coût initial total est faible. Si les problèmes associés aux systèmes à changement de phase sont résolus, ils seront les plus prometteurs à l'avenir [3]. La figure 12 présente une comparaison entre différents supports de stockage de la chaleur et le tableau 1 une comparaison des propriétés de transfert de chaleur et de la durée de vie de différents types de stockage thermique (Haselbacher, 2015), (N'Tsoukpoe et al., 2009).

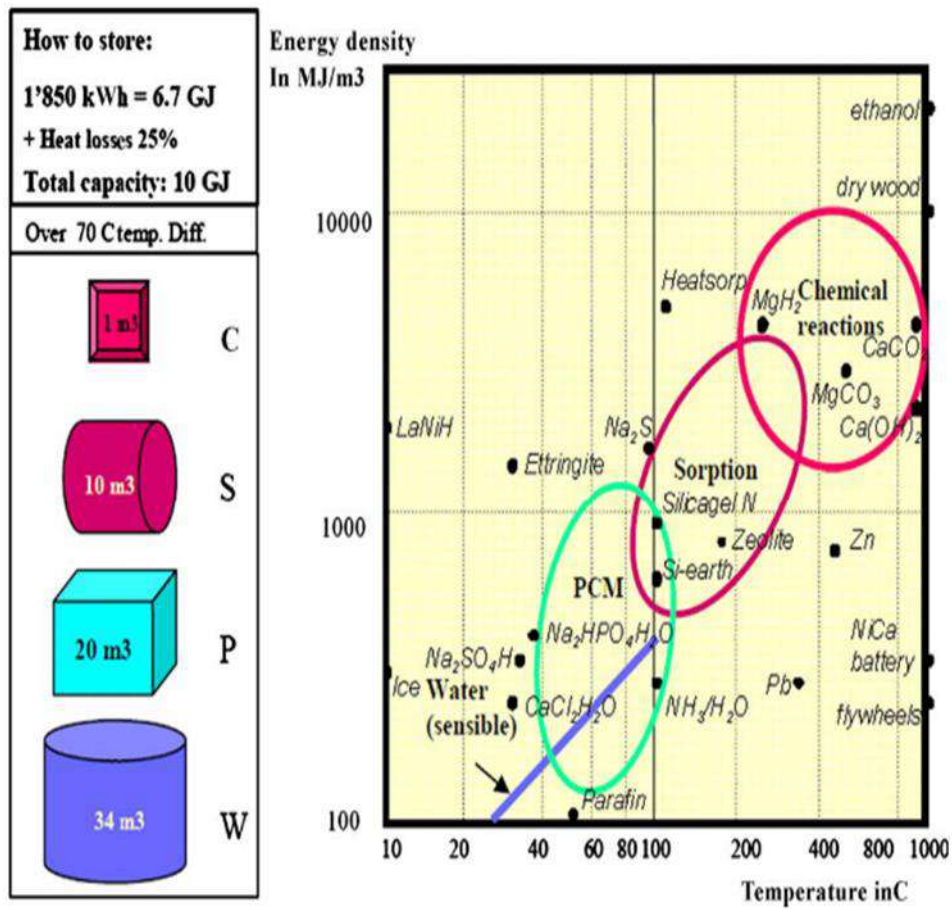


Figure 12 : Densité d'énergie des methods de stockage à haute énergie. (Crespo, Alicia)

12. Stockage par sorption :

La sorption comprend l'adsorption (en surface) et l'absorption (dans le volume) qui vont consommer de l'énergie. La transformation inverse, la désorption, résulte en la libération des molécules précédemment sorbes. Alors que la désorption est endothermique (stockage), la sorption est exothermique (déstockage) (Crespo, Alicia)

La figure 13 représente la classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique (HACHANI, 2018).

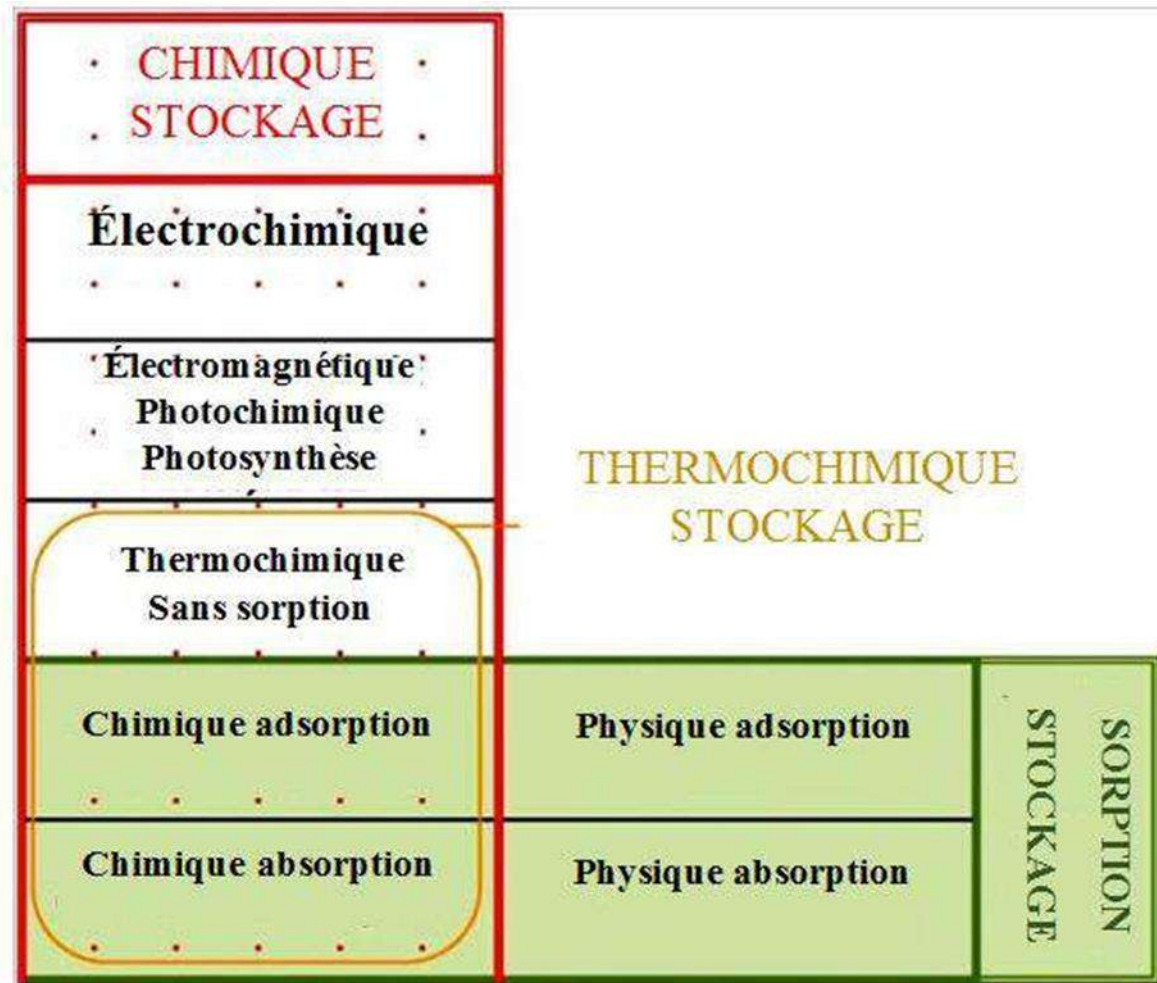


Figure 13 : Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique. (Crespo, Alicia)

13. Stockage d'énergie thermique par absorption

Le stockage de l'énergie thermique par absorption est configuré de différentes manières pour différents objectifs, notamment un système simple, une forte densité de stockage d'énergie et un rendement élevé. D'une manière générale, il peut être classé en deux catégories, à savoir les systèmes à une étape et les systèmes à deux étapes, sur la base du processus thermodynamique des paires de travail pendant le stockage. Ici, le stade fait référence au nombre de processus d'absorption contenus dans une configuration (Mehari et al., 2020a).

14. Systèmes de stockage d'énergie mécanique-thermique

TES pour le stockage adiabatique de l'énergie de l'air comprimé des systèmes de stockage adiabatique de l'énergie de l'air comprimé (A-CAES) ont été proposés pour améliorer l'efficacité globale du CAES en ajoutant une unité TES à haute température qui

stocke la chaleur de compression, qui aurait autrement été perdue pendant la phase de compression du gaz, pour l'utiliser ultérieurement pendant le processus de dilatation.

Le système A-CAES peut être divisé en trois parties, à savoir la charge, le stockage et la décharge. Pour la charge, un ou plusieurs moteurs électriques entraînent des compresseurs pour pressuriser l'air (> 75 bar). Pour le stockage, le système de stockage d'air comprimé stocke l'air à haute pression et le système de SET stocke la chaleur de compression pendant le processus de charge. Pour la décharge, un expandeur entraîne le générateur électrique. Le système TES peut être installé à l'intérieur du stockage d'air comprimé pour éviter l'utilisation d'un réservoir à haute pression. Ce type de système est appelé stockage adiabatique avancé de l'énergie de l'air comprimé (AA-CAES).

Le CAES fonctionne comme une batterie qui charge et décharge l'électricité. Il peut être facilement mis à l'échelle ; cependant, les grottes sont normalement utilisées pour réduire le coût du stockage, de sorte qu'il y a généralement des limitations géographiques ([Agence internationale pour les énergies renouvelables, 2020](#)).

Le Tableau 1 répertorie les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis: la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système ([Academique, 2019](#)).

Tableau 1 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.

		Stockage par Chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie Thermochimique
Densité D'énergie	Volumétrique	Faible~ 15-60kWh.m ⁻³	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m ⁻³	Elevée ~ 100-500kWh.m ⁻³
	Massique	Faible ~ 0,02-0,03kWh.kg ⁻¹	Moyenne~ 0,05-0,1kWh.kg ⁻¹	Haute~ 0,5-1 kWh.kg ⁻¹
Température De stockage		Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de charge ou ambiante
Durée de Stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes Thermiques)	Théoriquement Illimitée
Transport de L'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance Théoriquement
Maturité		Echelle industrielle (20 MW _e)	Echelle pilote (100 kW _{th})	Echelle laboratoire (1-5 kW _{th})
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

15. Critères de choix et de la conception d'un système de stockage :

Les critères de conception d'un système de stockage sont nombreux et leur importance relative est directement liée à la technologie de la centrale et au mode de fonctionnement souhaité. Si la capacité thermique, i.e. la quantité d'énergie stockée et restituée, est un point clé, d'autres critères doivent être pris en compte, qu'ils soient économiques: (Academique, 2019)

- Coût du matériau de stockage.
- Coût de l'échangeur de chaleur.
- Coûts d'investissement liés à l'encombrement du système de stockage;
- Densité énergétique élevée (par unité de masse ou de volume) ;
- Conductivité thermique élevée ;
- Transferts de chaleur efficaces entre le fluide caloporteur/de travail et le matériau de stockage ;
- Stabilité mécanique et chimique du matériau de stockage ;

- Compatibilité chimique entre le fluide caloporteur/de travail, l'échangeur de chaleur et/ou le matériau de stockage ;
- Réversibilité du matériau de stockage pour un nombre élevé de cycles de charge et de décharge;
- Peu de pertes thermiques;
- Contrôle/commande du procédé maîtrisé.

Tous ces points doivent être pris en compte lors de la conception et du dimensionnement de l'unité de stockage.

CHAPITRE III

Modélisation mathématique

1. Introduction :

La modélisation mathématique constitue une approche visant à représenter et à étudier des phénomènes complexes présents dans le monde réel en utilisant des concepts, des équations et des techniques mathématiques. Son objectif principal est de simplifier et d'abstraire la réalité afin de mieux comprendre et analyser les relations entre différentes variables et les processus sous-jacents. Les modèles peuvent se baser sur des équations différentielles, des équations algébriques, des systèmes d'équations, des graphes, des algorithmes ou une combinaison de ces outils.

La modélisation mathématique représente un outil essentiel pour appréhender et explorer les phénomènes complexes du monde réel. Elle offre des perspectives précieuses pour la prise de décisions éclairées, l'optimisation des performances et l'avancement des connaissances scientifiques et technologiques. En permettant de formuler des hypothèses, d'effectuer des prédictions et de tester des scénarios, la modélisation mathématique facilite la compréhension approfondie des systèmes complexes et contribue ainsi à la résolution de problèmes concrets dans divers domaines.

2. Les éléments Principales :

2.1. Capteurs solaires :

Les capteurs solaires plans ont été privilégiés par rapport aux capteurs à tubes sous vide pour les raisons suivantes :

- Ils sont en mesure de fournir de l'énergie à des températures allant jusqu'à 90°C, ce qui est suffisant pour alimenter le processus tout en réduisant les risques de cristallisation dans le désorbeur.
- Ils sont moins coûteux, plus durables et plus largement utilisés dans les installations domestiques. De plus, ils nécessitent moins d'entretien et sont moins fragiles que les capteurs sous vide.
- Ils génèrent pratiquement autant d'énergie que les capteurs sous vide, car ils peuvent fonctionner même sous une faible luminosité solaire tout en maintenant des températures suffisamment élevées.
- Un modèle simplifié de capteur solaire plan, dans lequel l'inertie thermique du capteur est négligée en raison de sa constante de temps généralement faible, a été adopté. La chaleur utile Q_{sc} délivrée par le capteur, avec une surface A_{sc} ,

2.2. Générateur :

Le générateur est situé entre les points 3 et 5, ou il se compose d'un réchauffeur qui chauffe la solution riche (H₂O-LIBR) jusqu'aux points d'évaporation, et d'un séparateur qui sépare la vapeur d'eau du bromure de lithium. La vapeur d'eau passe au condenseur, tandis que le bromure de lithium retourne à l'absorbeur.

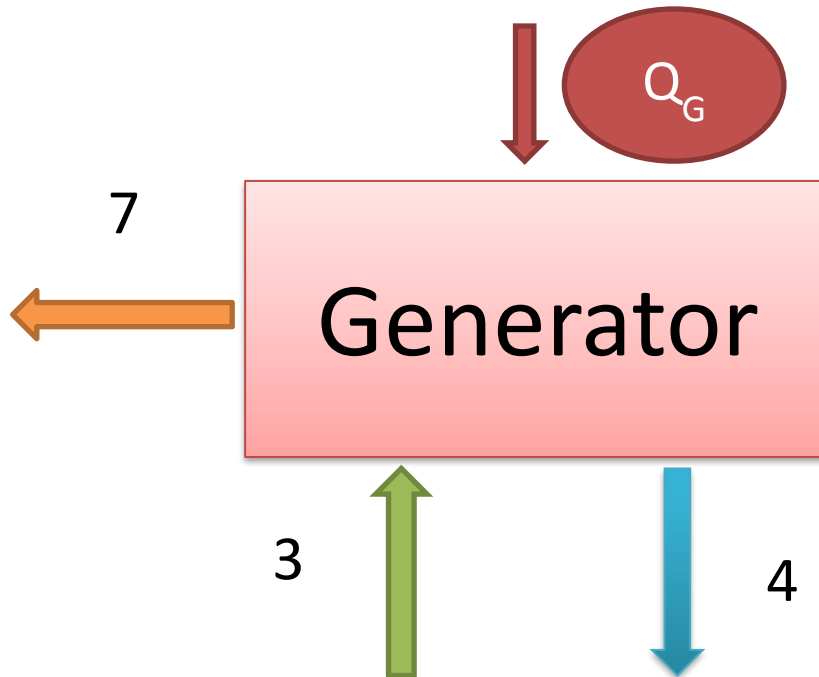


Figure 14 : schéma de générateur

La chaleur échangée dans le générateur est donc :

$$Q_b = m_4 \cdot h_4 + m_7 \cdot h_7 - m_3 \cdot h_3 \quad (\text{III.1})$$

2.3. Le condenseur :

Le condenseur est situé entre les points 5 et 6, ou il convertit la vapeur d'eau de l'état gazeux à l'état liquide.

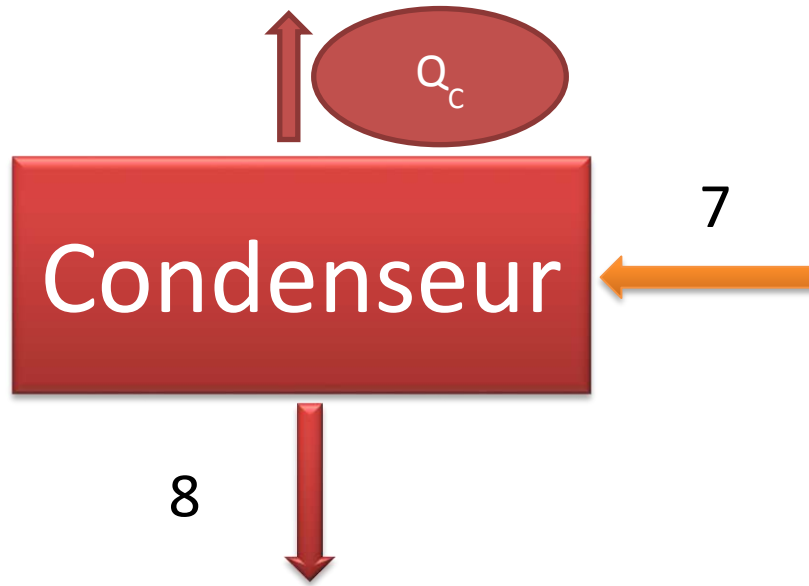


Figure 15 : schéma de condenseur

$$Q_c = m_7 \cdot (h_7 - h_8)$$

(III.2)

2.4. L'évaporateur :

L'évaporateur est situé entre les points 7 et 8, où il convertit l'eau de l'état liquide à l'état vapeur en absorbant la quantité de chaleur $Q_{év}$ du milieu à refroidir.

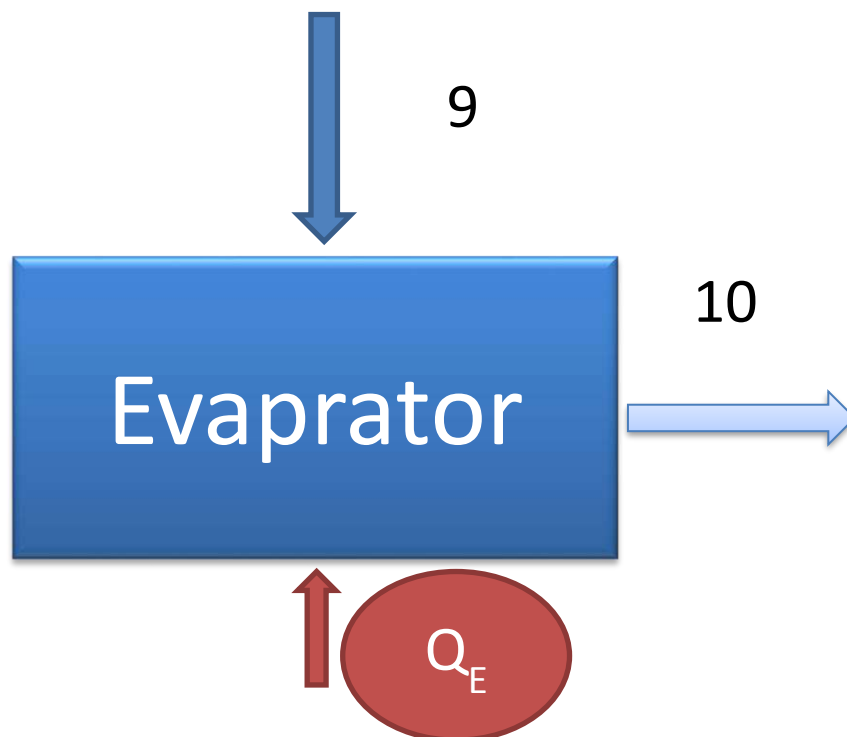


Figure 16 : schéma de évaporateur

2.5. L'absorbeur:

L'absorbeur est situé entre les points 8 et 9, ou l'absorbeur absorber la vapeur de l'eau produite par l'évaporateur et mélange cette vapeur avec bromure lithium. En appelle la solution résultante une solution riche.

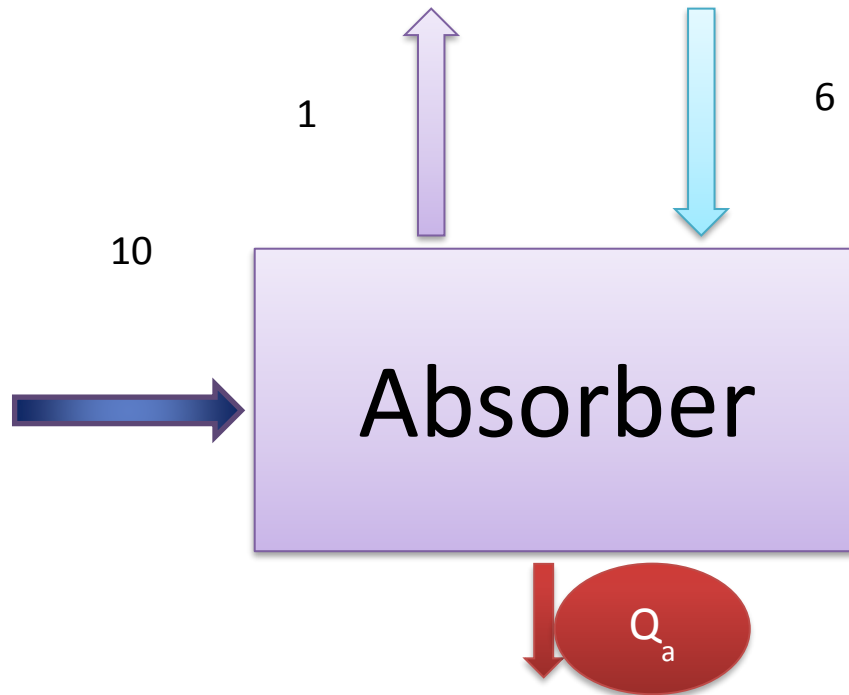


Figure 17 : schéma de absorbeur

$$Q_{ab} = m_{10}h_{10} + m_6h_6 - m_1h_1 \quad (\text{III.3})$$

2.6. La pompe :

Le travail fourni par les pompes (W_1 et W_2) pour transférer de l'énergie à la solution et à l'eau est estimé en utilisant un rendement isentropique pour chaque pompe. On fait l'hypothèse que la densité du liquide reste constante entre la sortie du réservoir et l'entrée de l'échangeur, qu'il s'agisse du générateur ou du condenseur. L'équation suivante donne le travail w_1 fourni par la pompe W_1 à la solution :

$$w_1 = v_{1s} \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{\eta_{isw1}} \quad (\text{III.4})$$

w : travail de la pompe (KJ/kg)

v : vitesse (m/s)

p : pression (Pa)

η : Rendement

2.7. Les caractéristiques de BrLi :

$$h(x, t) = 1744 \cdot x^2 - 1911 \cdot x + 285 + C_p(x) \cdot (t - 25) \quad \text{(III.5)}$$

-La chaleur massique de la solution a pour relation:

$$C_p(x) = (2.01 \cdot x^2 - 5,15 \cdot x + 4,23) \quad \text{(III.6)}$$

-La conservation de la débite de LiBr:

$$m_1 + m_{sr} = m_{sp} \quad \text{(III.7)}$$

-La conservation de l'énergie:

$$m_{sr} \cdot x_{sr} - x_{sp} \cdot m_{sp} = 0$$

Le coefficient de performance thermodynamique:

$$COP = \frac{\Phi_o}{\Phi_b} \quad \text{(III.8)}$$

$\Phi_0 = \Phi_e$: Puissance de l'évaporateur

(3

$$-38h_2 = h_{H2O}(T_2) = 4185(T_2 - 25)$$

$\Phi_0 = \Phi_e$: Puissance de l'évaporateur

$$h_2 = h_{H2O}(T_2) = 4185(T_2 - 25)$$

Ces données constituent le point de départ pour une analyse thermodynamique d'un système à absorption. Le rendement d'une PAC est défini par son coefficient de performance (COP). En chauffage on s'intéresse à l'énergie calorifique cédée dans le condenseur et l'absorbeur donc :

$$COP = \frac{Q_c + Q_a}{Q_g + W_p} \quad \text{(III.9)}$$

En mode froid et climatisation, nous avons :

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g + W_p} \quad \text{(III.10)}$$

Q_e est la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur.

Q_c est la quantité de chaleur cédée par le condenseur.

Q_a est la quantité de chaleur cédée par l'absorbeur.

Q_g est la quantité de chaleur fournit au générateur.

W_p est le travail de la pompe de solution.

En supposant que le travail de la pompe sur la solution riche est négligeable par rapport aux autres termes, le coefficient devient :

- pour le chauffage :

$$COP = \frac{Q_c + Q_a}{Q_g} \quad (\text{III.11})$$

- pour froid et climatisation :

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (\text{III.12})$$

La conservation de la masse et de l'énergie doit être déterminée. Pour le générateur, les bilans massiques et énergétiques donnent :

$$m_7 = m_8 + m_1 \text{ (Bilan massique total)} \quad (\text{III.13})$$

$$m_7 X_7 = X_8 m_8 + m_1 \text{ (Bilan de masse)} \quad (\text{III.14})$$

$$Q_g e = m_8 h_8 + m_1 h_1 - m_7 h_7 \quad (\text{III.15})$$

Les débits des solutions riches et pauvres peuvent être déterminés :

$$m_8 = \frac{1 - X_7}{X_7 - X_8} m_1 \quad (\text{III.16})$$

$$m_9 = \frac{1 - X_8}{X_7 - X_8} m_1 \quad (\text{III.17})$$

- Le bilan énergétique de l'échangeur de chaleur à solution est le suivant :

$$T_9 = E_{ex} T_6 + (1 - E_{ex}) T_8 \quad (\text{III.18})$$

$$h_7 = h_6 + \frac{m_8}{m_6} (h_8 - h_9) \quad (\text{III.19})$$

- L'augmentation d'énergie par pompage est :

$$h_6 = h_5 + (P_6 - P_5) v_6 \quad (\text{III.20})$$

$$W_{me} = (P_6 - P_5) v_6 \quad (\text{III.21})$$

- Les bilans énergétiques du rendement de l'absorbeur, du condenseur et de l'évaporateur :

$$Q_a = m_4 h_4 + m_{10} h_{10} - m_5 h_5 \quad (\text{III.22})$$

$$Q_c = m_1 (h_1 - h_2) \quad (\text{III.23})$$

$$Q_e = m_1 (h_4 - h_3) \quad (\text{III.24})$$

En fournissant les températures du générateur, du condenseur, de l'absorbeur et de l'évaporateur, ainsi que le débit massique de réfrigérant et la charge frigorifique requise, les équations précédentes peuvent être résolues simultanément pour obtenir les performances du système.

Les performances thermodynamiques du système sont quantifiées par des variables telles que

le coefficient de performance (COP) du système.

La relation entre la pression de saturation P (exprimée en Kpa), la température T (exprimée en °C) et la concentration du mélange de bromure de lithium et d'eau est décrite par la formule suivante :

$$\log P = C + D/(T_{ref} + 273) + E/(T_{ref} + 273)^2$$

Avec:

$$C = 7.05. D = -1596349. E = -104095.5$$

$$T_{ref} = (-2E(D + [D^2 - 4E(C - \log P)]^{0.5}) - 273$$

$$T_{sol} = \sum B + T_{ref} \sum A$$

Avec:

$$\Sigma A = A_0 X^0 + A_1 X^1 + A_2 X^2 + A_3 X^3$$

$$\Sigma B = B_0 X_0 + B_1^1 X_1 + B_2^2 X_2 + B_3^3 X_3$$

$$A_0 = -2.00755 \quad B_0 = 124.937$$

$$A_1 = 0.16976 \quad B_1 = -7.71649$$

$$A_2 = -0.003133362 \quad B_2 = 0.152286$$

$$A_3 = 0.0000197668 \quad B_3 = -0.0007959$$

T_{sol} est la température de la solution (en C°), $5^\circ\text{C} < T_{sol} < 175^\circ\text{C}$

T_{ref} est la température du réfrigérant (en C°), $-15^\circ\text{C} < T_{ref} < 110^\circ\text{C}$

Pour : $0\% < X < 40\%$

$$h = [CA_0 + C_1 \cdot X + C_2 \cdot X^2 + CT(C_0 + CB_1 \cdot X + CB_2 \cdot X^2)] \cdot 2.326$$

Avec :

$$CA_0 = -33.1054264 \quad CB_0 = 1.0090734$$

$$CA_1 = 0.13000636 \quad CB_1 = -0.01377507$$

$$CA_2 = 0.00097096 \quad CB_2 = 0.000085131$$

$$CT = \text{Température (C°)}$$

$$h = \text{enthalpie (kj/kg)}$$

$$X = \%LiBr$$

$$T = (CT \cdot 9/5) + 32$$

Pour : $40\% < X < 70\%$ [36]

$$h = \sum A + \sum TB + \sum CT^2$$

$$\Sigma A = A_0 X^0 + A_1 X^1 + A_2 X^2 + A_3 X^3 + A_4 X^4$$

$$\Sigma A = A_0 X^0 + A_1 X^1 + A_2 X^2 + A_3 X^3 + A_4 X^4$$

$$\Sigma B = B_0 X_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + B_4 X_4$$

$$\Sigma C = C_0 X^0 + C_1 X^1 + C_2 X^2 + C_3 X^3 + C_4 X^4$$

Avec:

$$\begin{array}{lll}
 A = -2024.33 & B_0 = 18.2829 & C_0 = -0.037008214 \\
 A_1 = 163.309 & B_1 = -1.1691757 & C_1 = 0.0028877666 \\
 A_2 = -4.88161 & B_2 = 0.03248041 & C_2 = -0.000081313015 \\
 A_3 = 0.06302948 & B_3 = -0.0004034184 & C_3 = 0.00000099116628 \\
 A_4 = -0.0002913704 & B_4 = 0.0000018520569 & C_4 = -0.0000000044441207
 \end{array}$$

T = Température de la solution (C), $15^\circ\text{C} < T < 165^\circ\text{C}$.

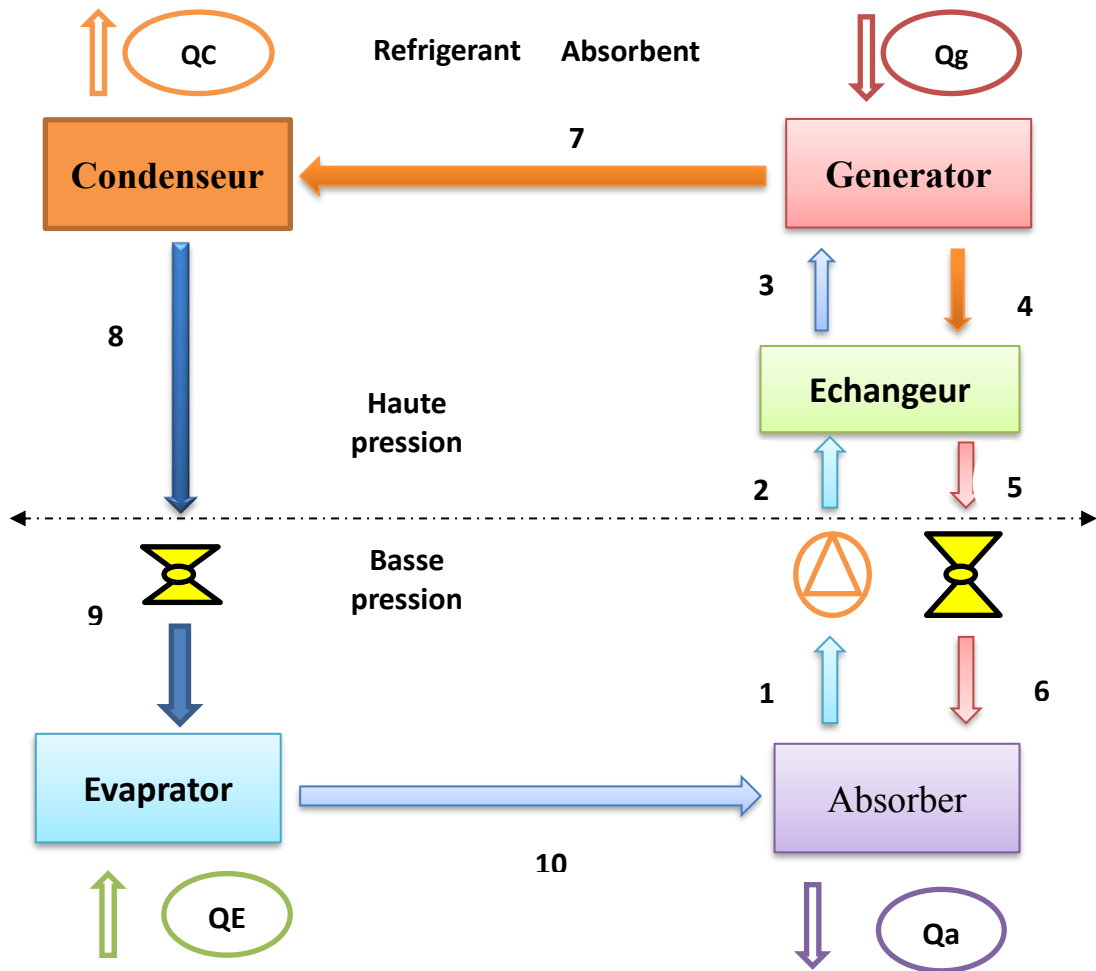


Figure 18 : Schéma de principe d'une machine à absorption à simple effet.

CHAPITRE IV

Résultats et discussion

1. Introduction :

Une fois le cycle de ce système calculé, nous avons entrepris une série de modifications et d'ajustements des températures et des pressions. Cela a abouti à un ensemble de résultats et de valeurs résumés dans le présent chapitre.

- D'après l'utilisation Programme MATLAB on obtenu :

2. Principales propriétés des différents points du cycle de la machine à absorption liquide (LiBr/H₂O) :

La conception d'un système de cycle d'absorption d'eau et de bromure de lithium à effet unique nécessite une évaluation précise. Pour effectuer ces estimations, il est essentiel de prendre en compte certaines hypothèses de base et des valeurs d'entrée. Les hypothèses de base suivantes sont formulées :

- Le réfrigérant utilisé est de l'eau pure à l'état stable.
- Aucun changement de pression n'a lieu, sauf à travers les limiteurs de débit et la pompe.
- Aux points 1, 4, 8 et 10, seul un liquide saturé est présent.
- Au point 10, seule une vapeur saturée est présente.
- Les limiteurs de débit sont considérés comme adiabatiques, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'échange de chaleur avec l'environnement.
- La pompe est supposée isentropique, ce qui signifie qu'elle n'engendre aucune perte d'énergie sous forme de chaleur ou de travail.
- Aucune perte de chaleur n'est considérée dans la chemise du système.

3. Caractéristiques thermodynamiques des points et les performances de la machine à absorption :

Tableau 1 : Propriété thermodynamique des points et les performances de la machine à absorption présentée par Fluoride.

Point	T(°c)	P (kPa)	X (%)	m (kg/s)	H (kJ/kg)
1	34.9	0.934	55	0.053	83
2	34.9	9.66	55	0.053	83
3	65	9.66	55	0.053	145.4
4	90	9.66	60	0.0486	212.2
5	54.8	9.66	60	0.0486	144.2
6	44.5	0.934	60	0.0486	144.2
7	85	9.66	0	0.0044	2628
8	44.3	9.66	0	0.0044	185.3
9	6	0.934	0	0.0044	185.3
10	6	0.934	0	0.0043	2511.8

CONCLUSION

Tableau 2 : Flux d'énergie au niveau des différents composants du système.

Désignation	Symbole	KW
Capacité (puissance de sortie de l'évaporateur)	Q_{ev}	10.0
Débit de travail minimum de la pompe	w	0.29
Chaleur de l'absorbeur, rejetée dans l'environnement	Q_a	13.42
Apport de chaleur au générateur	Q_g	14.2
chaleur du condenseur, rejetée dans l'environnement	Q_c	10.72
Coefficient de performance	COP	0.70

Tableau 3 : Propriétés thermodynamiques des points de la machine d'absorption $T_g=90^\circ\text{C}$.

Point	T (°C)	P (Kpa)	X (%)	\dot{m} (Kg/s)	H (Kj/kg)
1	35	0,934	55	0,053	83,3161
2	35	9,66	55	0,053	83,3161
3	67,78	9,66	55	0,053	151,1394
4	90	9,66	60	0,0486	212,1909
5	54,25	9,66	60	0,0486	143,1927
6	44,05	0,934	60	0,0486	123,4228
7	85	9,66	0	0,0044	2651,4
8	44,05	9,66	0	0,0044	184,1290
9	44,05	0,934	0	0,0044	184,1290
10	6	0,934	0	0,0044	2511,8

On remarque d'après les tableaux que les valeurs obtenues approche les valeurs parfaits

4. Comparaison entre les résultats obtenus et les résultats du Fluorure

En comparant les résultats obtenus avec les travaux présentés par Fluorure, la courbe inférieure du graphique représente les valeurs d'enthalpie en fonction des différents points du

CONCLUSION

système de la machine à absorption. Il est important de noter que le programme de calcul utilisé a produit des résultats cohérents et précis.

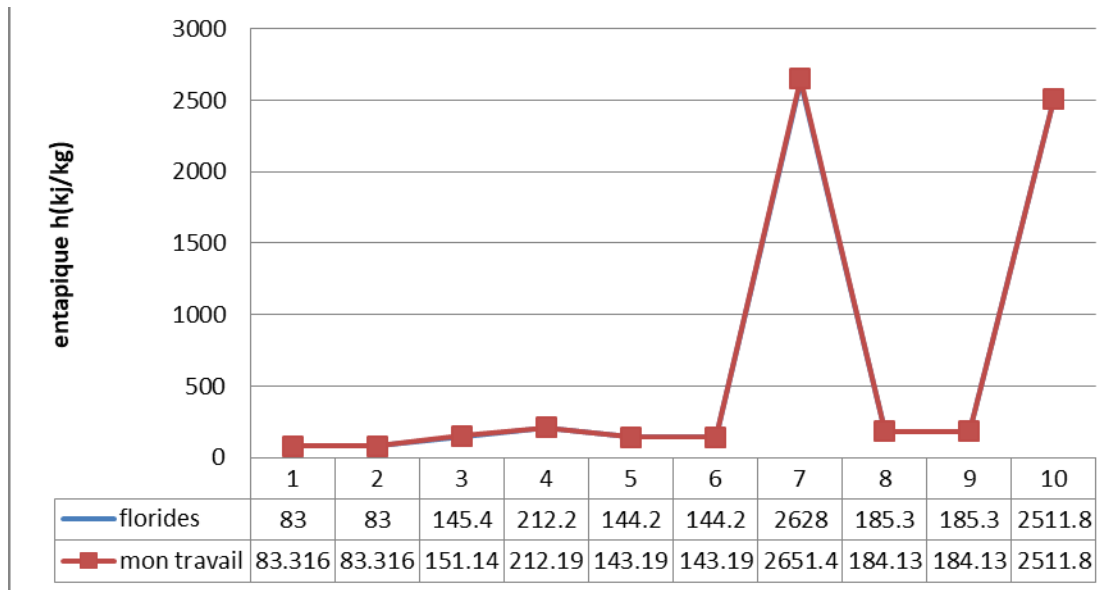


Figure 19 : L'enthalpie en fonction des différents points du cycle de la machine à absorption liquide (LiBr/H₂O).

5. Etude paramétrique :

Coefficient de performance en fonction de température du générateur :

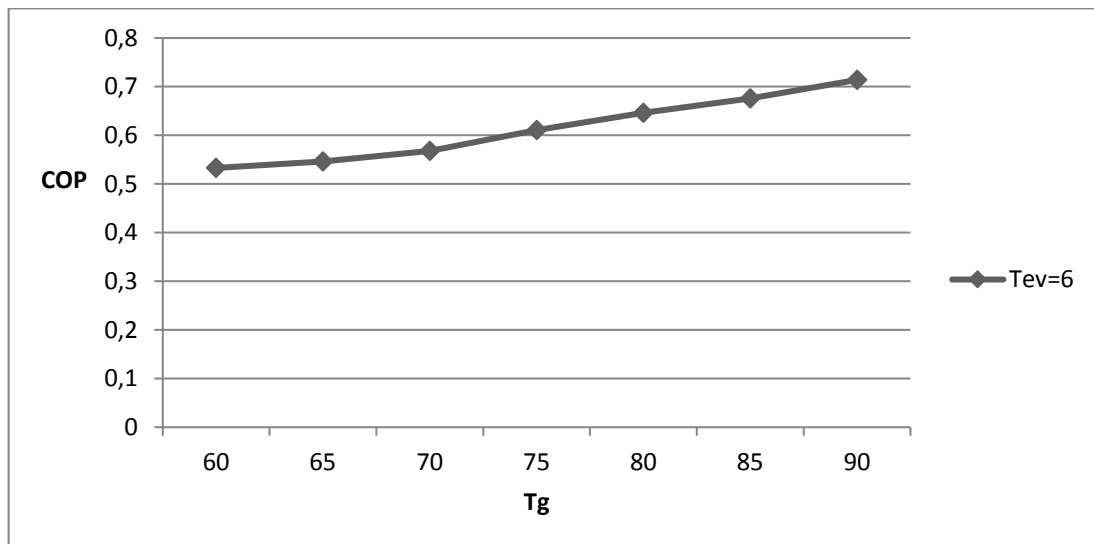


Figure 20 : Coefficient de performance COP en fonction de température du générateur T_g .

La courbe illustre clairement que le coefficient de performance (COP) augmente à mesure que la température du générateur (T_g) augmente. Ainsi, la température du générateur est directement proportionnelle au COP. Il est important de souligner que cette augmentation du COP est due à une augmentation de la quantité de chaleur Q_g .

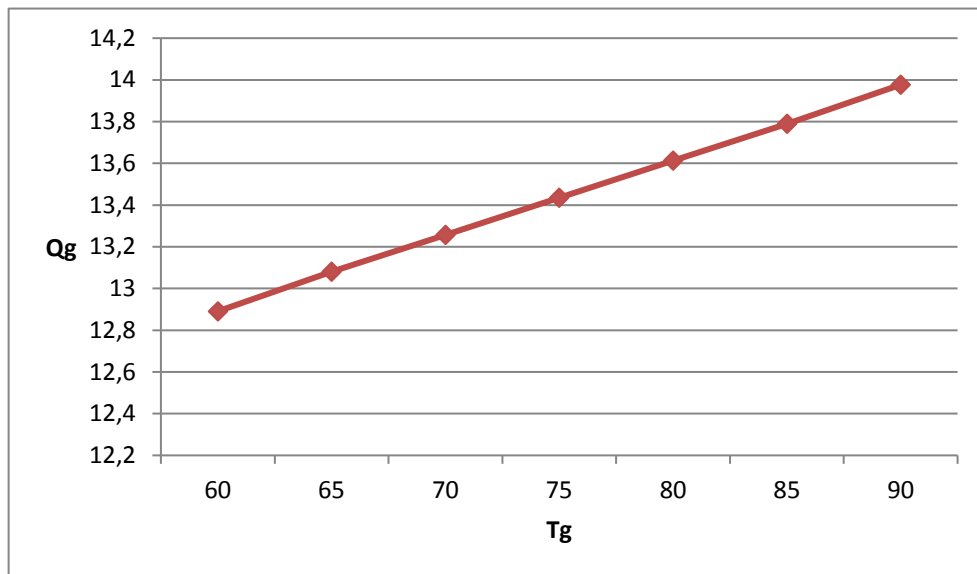


Figure 21 : représente la quantité de chaleur fournie au générateur Q_g .

La courbe représentant la quantité de chaleur extraite (Q_g) en fonction de la température du générateur reflète le mode d'échange de chaleur dans le processus. Lorsque la température du générateur augmente, la quantité de chaleur extraite augmente généralement également. Cela s'explique par le fait qu'une augmentation de la température crée une plus grande différence de température entre la source chaude (le générateur) et la source froide (l'absorbeur), ce qui facilite l'échange de chaleur entre les deux.

Dans le cas de l'absorbeur, la quantité de chaleur extraite dépend également des caractéristiques propres à l'absorbeur, comme le matériau utilisé dans le cycle d'absorption et ses propriétés thermiques. À des températures plus élevées, l'absorbeur peut absorber davantage de chaleur, ce qui améliore l'efficacité globale de la machine absorbante, comme le montre la Figure 21 ci-dessus.

Il convient cependant de noter qu'il n'existe pas de relation linéaire directe entre la température du générateur et la quantité de chaleur extraite. D'autres facteurs tels que l'efficacité du système ou la conception du cycle thermique peuvent également influencer la quantité de chaleur extraite.

L'augmentation de la température du générateur entraîne généralement une augmentation de la quantité de chaleur extraite, mais cette relation peut être complexe et dépendre de nombreux autres facteurs.

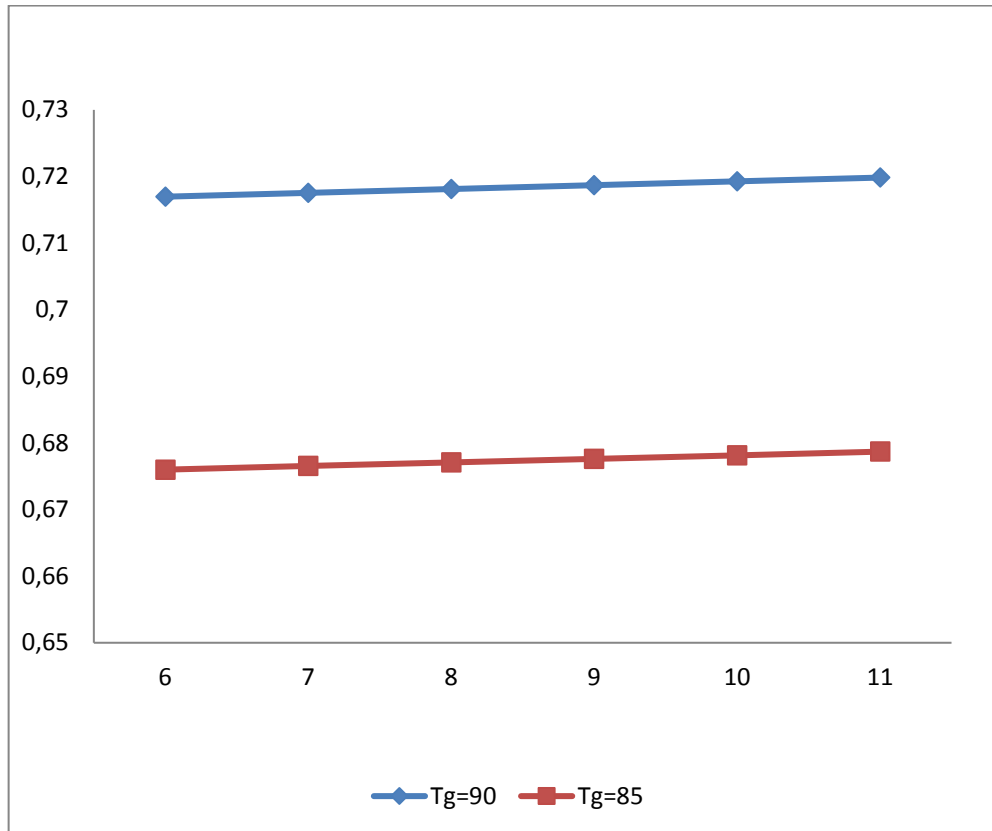


Figure 22 : coefficient de performance COP en fonction de température du générateur T_{ev} .

La variation du coefficient de performance (COP) est tracée en fonction de la température de l'évaporateur, en tenant compte de la variation de la température du générateur. Il est observé que le coefficient de performance augmente à mesure que la température du générateur et de l'évaporateur augmente. Cette augmentation est logique, car à mesure que la température de l'évaporateur et du générateur augmente, la quantité de chaleur extraite par l'évaporateur et la quantité de chaleur extraite du générateur augmentent également. Cette relation est directe, conformément à l'équation $COP = Q_{ev}/Q_g$.

Conclusion générale:

Les systèmes de stockage à absorption, en particulier lorsqu'ils sont associés à un système solaire, offrent de nombreux avantages significatifs, notamment :

- Faible entretien et absence de machines tournantes puissantes : Les systèmes de stockage à absorption sont des alternatives sûres et silencieuses aux systèmes de compression mécanique, ce qui réduit les besoins en entretien et en puissance.
- Utilisation efficace de l'énergie thermique solaire : Ces systèmes permettent l'utilisation et le stockage efficaces de l'énergie thermique solaire.

Dans cette étude, nous avons présenté une méthode de stockage de l'énergie solaire thermique à des fins de chauffage résidentiel basée sur le phénomène d'absorption. Les principaux objectifs de travail sont l'étude des paires d'absorption LiBr-H₂O et la conception des systèmes pour démontrer la faisabilité concrète de ce concept. Nous avons examiné également les principales méthodes de stockage thermique solaire par sorption, en mettant en évidence l'importance de l'absorption comme une méthode potentiellement très utile pour le stockage thermique à long terme.

Après avoir analysé les résultats de cette étude sur le stockage par absorption, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La faisabilité d'un processus de stockage solaire thermique à long terme, basé sur un stockage par absorption à haut rendement, dans notre pays.
- Ce système peut également être utilisé à court terme pour des opérations de refroidissement estival nocturne dans notre pays.

Références bibliographiques

- 1) Académique, M. (2019). *Etude de stockage de l' énergie thermique par sorption liquide-gaz application aux bâtiments à basse consommation.*
- 2) Cabeza, L. F., Martorell, I., Miró, L., Fernández, A. I., & Barreneche, C. (2015). Introduction to thermal energy storage (TES) systems. In *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Woodhead Publishing Limited.
- 3) <https://doi.org/10.1533/9781782420965.1>
- 4) Carre, F., Holden, D., Rankin, T., & Altenkirch, E. (1875). *La machine a absorption 1)*. 2–4.
- 5) Coeytaux, M. (1978). Le Stockage Thermique De L'Énergie. *RFM, Revue Francaise de Mecanique*, 66, 17–19.
- 6) Crespo, Alicia; Fernández, Cèsar; de Gracia, Alvaro; Frazzica, A. (2022). Solar-Driven Sorption System for Seasonal Heat Storage under Optimal Control: Study for Different Climatic Zones. *Energies*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/en15155604>
- 7) HACHANI. (2018). *Mémoire de Master Mémoire de Master. 2013*, 2019–2020.
- 8) Larkeche, O. (2012). *Modelisation D'Une Machine Frigorifique a Absorption : Application Des Equilibres De Phases*. 127.
- 9) Los, U. M. D. E. C. D. E. (n.d.). *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析*Title.
- 10) N'Tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2385–2396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.008>
- 11) Pau, U. D. E., Des, E. T., & Adour, P. D. E. L. (2015). *Thermal storage by latent heat*. 10–13.
- 12) Thermodynamique, E., & Rabat, M. De. (2018). *Modélisation et simulation d' une machine frigorifique à absorption solaire. May 2016*, 18–19.
- 13) Wakim, M. (2018). *Etude des machines à absorption pour la valorisation de la chaleur fatale basse température To cite this version : HAL Id : tel-01778402 THÈSE DE DOCTORAT de l' Université de recherche Paris Sciences et Lettres Préparée à MINES ParisTech Etude des machin.*
- 14) Académique, M. (2019). *Etude de stockage de l' énergie thermique par sorption liquide-gaz application aux bâtiments à basse consommation.*
- 15) Cabeza, L. F., Martorell, I., Miró, L., Fernández, A. I., & Barreneche, C. (2015).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Introduction to thermal energy storage (TES) systems. In *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781782420965.1>
- 16) Carre, F., Holden, D., Rankin, T., & Altenkirch, E. (1875). *La machine a absorption 1*). 2–4.
- 17) Coeytaux, M. (1978). Le Stockage Thermique De L'Energie. *RFM, Revue Francaise de Mecanique*, 66, 17–19.
- 18) Crespo, Alicia; Fernández, Cèsar; de Gracia, Alvaro; Frazzica, A. (2022). Solar-Driven Sorption System for Seasonal Heat Storage under Optimal Control: Study for Different Climatic Zones. *Energies*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/en15155604>
- 19) HACHANI. (2018). *Mémoire de Master Mémoire de Master*. 2013, 2019–2020.
- 20) Larkeche, O. (2012). *Modelisation D'Une Machine Frigorifique a Absorption : Application Des Equilibres De Phases*. 127.
- 21) Los, U. M. D. E. C. D. E. (n.d.). *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析*Title.
- 22) N'Tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2385–2396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.008>
- 23) Pau, U. D. E., Des, E. T., & Adour, P. D. E. L. (2015). *Thermal storage by latent heat*. 10–13.
- 24) Thermodynamique, E., & Rabat, M. De. (2018). *Modélisation et simulation d ' une machine frigorifique à absorption solaire*. May 2016, 18–19.
- 25) Wakim, M. (2018). *Etude des machines à absorption pour la valorisation de la chaleur fatale basse température* To cite this version: HAL Id: tel-01778402 THÈSE DE DOCTORAT de l ' Université de recherche Paris Sciences et Lettres Préparée à MINES ParisTech Etude des machin.