

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie Mécanique

**Spécialité** : Energétique

**Par** : BENABDERRAHMANE Abdelhakim Esseddik & KEDDAR Adil Mohammed

### **Sujet**

**Analyse exergoéconomique d'un système de réfrigération à absorption entraîné par une source solaire**

Soutenu publiquement, le 23 /09/2024, devant le jury composé de :

M. BENRAMDANE.Mohammed	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme. BENAHMED Lamia	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M. ALIANE Abdenour	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
M. ABDESLAM Bilal	Doctorant	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2023 /2024

# REMERCIEMENTS

Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à nos encadreurs, Messieurs A. ALIANE et B. ABDESSELAM , pour leur soutien constant, nous exprimons également notre respectueuse gratitude envers Mr M.BENRAMDANE, qui a présidé le jury de soutenance. Nous remercions tous nos amis et nos parents qui nous ont soutenus tout au long de cette période.

# DEDICACE

Nous dédions ce travail à nos chers  
Parents, Vos sacrifices ont été pour nous le meilleur  
soutien durant ce long parcours.

# SOMMAIRE

Remerciements .....	IV
Dédicace .....	IV
Sommaire.....	IV
List des Figures.....	IV
List des Tableau.....	IV
Résumé.....	IV
Nomenclature.....	IV
Introduction générale.....	1
Chapitre I.....	4
I.1. Introduction .....	4
I.2. L’histoire des systèmes de réfrigération à absorption .....	4
I.3. Energie solaire en système de réfrigération.....	5
I.3.1 Généralités sur l’énergie solaire .....	5
I.3.2 L’énergie solaire et à produire du froid .....	6
I.4. Intégration de l’énergie solaire dans les systèmes de réfrigération .....	7
I.4.1 Système de Refroidissement Solaire Photovoltaïque:.....	8
I.4.2 Système de Refroidissement Solaire Thermo-voltaïque .....	9
I.4.3 Système de refroidissement Thermo-Mécanique .....	10
I.4.4 Système de Refroidissement par Adsorption .....	11
I.5. Exemples d’application dans les systèmes de réfrigération solaire .....	11
I.6. Intérêt de la production de froid par absorption et statistique économique .....	12
I.7. Les aspects économiques des systèmes de climatisation solaire .....	13
I.8. Composants de Machine à absorption .....	14
I.8.1 Evaporateur .....	15
I.8.2 Absorbeur .....	15
I.8.3 Désorbeur .....	16
I.8.4 Condenseur .....	16

---

I.8.5	Le détendeur .....	17
I.8.6	Pompe : .....	18
I.8.7	Echangeur de chaleur .....	18
I.8.8	Capteur solaire .....	19
I.9.	Comparaison entre la machine frigorifique à absorption et celle à compresseur mécanique .....	19
I.9.1	Les avantages et inconvénients par rapport aux systèmes classiques .....	21
I.10.	Principe de fonctionnement machine frigorifique à absorption .....	21
I.10.1	Processus d'absorption .....	23
I.11.	Choix du couple .....	24
I.11.1	Avantages et inconvénients .....	25
I.12.	Définitions et principes fondamentaux .....	26
I.12.1	Énergie .....	26
I.12.2	L'exergie .....	26
I.13.	Etude exergoéconomique .....	27
I.14.	Conclusion .....	29
Chapire II	.....	30
II.1.	Introduction .....	30
II.2.	Description du système étudié .....	30
II.3.	Analyse énergétique et exégétique de système réfrigération par absorption simple effet .....	31
II.3.1	Pompe .....	32
II.3.2	Échangeur de chaleur à récupération de chaleur .....	33
II.3.3	Générateur .....	34
II.3.4	Condenseur .....	36
II.3.5	Évaporateur .....	37
II.3.6	Absorbeur .....	38
II.3.7	Valve d'expansion (pour la solution faible).....	39
II.3.8	Valve d'expansion (pour le réfrigérant) .....	40
II.3.9	Les coefficients de performance énergétique et exégétique .....	41
II.4.	Analyse Exergoéconomique .....	41
II.5.	Conclusion .....	43
Chapire III	.....	44

---

III.1.	Introduction .....	44
III.2.	Description du logiciel EES .....	44
III.3.	Conditions de fonctionnement pour le cycle simple effet .....	44
III.4.	Etude paramétrique du cycle .....	45
III.5.	Influence de l'apport de chaleur .....	46
III.6.	Influence du rejet de chaleur sur les performances du cycle .....	50
III.7.	Influence de la concentration de la solution forte sur les performances du cycle.....	52
III.8.	Influence de température d'évaporateur sur les performances du cycle .....	52
III.9.	Influence d'efficacité d'échangeur sur les performances du cycle .....	54
III.10.	Conclusions .....	59
	Conclusion Générale.....	61
	Bibliographie.....	63

# LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : La première machine à réfrigération par absorption utilisant de l'eau et de l'acide sulfurique .....	5
Figure I-2: : Inclinaison de 90° par rapport aux rayons du soleil (au centre) = production optimale .....	6
Figure I-3 : Adéquation entre la présence de soleil et besoin en climatisation .....	7
Figure I-4: : Différentes technologies de production du froid à partir de l'énergie solaire .	8
Figure I-5: Système de Refroidissement Solaire Photovoltaïque .....	9
Figure I-6: Système de Refroidissement Solaire Thermo-voltaïque .....	10
Figure I-7 : Machine frigorifique basée sur un processus thermomécanique (a) le cycle séparé, (b) le cycle intégré .....	10
Figure I-8: Schéma d'une machine frigorifique solaire à adsorption .....	11
Figure I-9: Distribution mondiale de la puissance frigorifique assisté par l'énergie .....	13
Figure I-10: Plage des coûts spécifiques pour les différents types de refroidisseurs en fonction de la puissance de refroidissement .....	14
Figure I-11: Schéma de Evaporateur .....	15
Figure I-12 Schéma d'absorbeur .....	15
Figure I-13: Schéma de Désorbeur .....	16
Figure I-14: Schéma de Condenseur .....	16
Figure I-15: Schéma de Détendeur .....	17
Figure I-16 : Schéma de Pompe .....	18
Figure I-17: Echangeur de chaleur à plaque .....	18
Figure I-18: capteur solaire thermique plan .....	19
Figure I-19: Comparaison entre les systèmes de refroidissement à absorption et ceux à compression mécanique .....	19
Figure I-20 : Diagramme de Dühring pour les cycles frigorifiques à compression mécanique et à compression chimique .....	20
Figure I-21: Schéma d'une machine réfrigération solaire à absorption .....	22
Figure I-22: Cycle de fonctionnement dans le diagramme de Oldham ( $\ln P, -1/T$ ) .....	23
Figure I-23: Schematic illustration of an absorption process .....	24
Figure I-24 : Plan d'étude exergoéconomique .....	28
Figure II-1: le système de réfrigération à absorption simple effet .....	31
Figure II-2: Schéma de la pompe .....	32
Figure II-3: Schéma de Echangeur .....	33
Figure II-4: Schéma de générateur .....	34
Figure II-5 : Schéma de condenseur .....	36
Figure II-6: Schéma de Evaporateur .....	37
Figure II-7: Schéma de l'absorbeur .....	38

---

Figure II-8: Schéma Valve d'expansion (pour la solution faible).....	39
Figure II-9 : Schéma de Valve d'expansion (pour le réfrigérant).....	40
Figure III-1 : <i>Influence de la température du fluide générateur sur les pressions de travail et le (COP en) et (COP ex)</i> .....	47
Figure III-2 : Influence de T[11]sur des quantités de chaleur mises en jeu .....	48
Figure III-3 : Influence de la taille du désorbeur (le coefficient global de transfert de chaleur du désorbeur) sur le (COP en) et (COP ex) et la capacité frigorifique (Qe).....	49
Figure III-4 : <i>Influence de la température de rejet de chaleur sur le COP et les pressions de travail</i> .....	49
Figure III-5 : Influence du coefficient global de transfert de chaleur du condenseur sur le 50	
Figure III-6 : <i>Influence du coefficient global de transfert de chaleur de l'absorbeur sur le COP et la capacité calorifique.</i> .....	51
Figure III-7 : Effets de la concentration de la solution forte sur les (COP en) et (COP ex). .....	52
Figure III-8 : Influence de température d'évaporateur sur les différent chaleur .....	53
Figure III-9 : Influence de température d'évaporateur sur les COP .....	54
Figure III-10 : Influence d'efficacité d'échangeur sur les différent chaleur. ....	55
Figure III-11: Influence d'efficacité d'échangeur sur les COP. ....	56
Figure III-12: Les effets de la charge du générateur sur la capacité de refroidissement et le coût du refroidissement. ....	57
Figure III-13: Effets de la variation de la concentration de la solution forte sur la charge de refroidissement et le coût du refroidissement.....	58



# LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Les avantages et inconvénients par rapport aux systèmes classiques.....	21
Tableau I-2: Couple utilisés pour le système à absorption .....	24
Tableau I-3: Propriétés du fluide de travail d'absorption.....	26
Tableau III-1 : Conditions de fonctionnement pour le cycle réfrigération par absorption simple effet . .....	44
Tableau III-2: Résumé des état thermodynamique pour la simulation.....	45

**ملخص :**

يمكن أن تكون أنظمة التبريد بالامتصاص الشمسي حلاً ممتازاً للتبريد المستدام، لكنها تواجه بعض الصعوبات. تميل هذه الأنظمة إلى أن تكون أقل كفاءة من أنظمة التبريد التقليدية بالضغط الميكانيكي، خاصة خلال فترات الإشعاع الشمسي المنخفض. غالبًا ما تتطلب مساحات أكبر من المجمعات لالتقاط كمية كافية من الطاقة الشمسية، مما قد يزيد من تكاليف التركيب والحجم. يمكن أن يكون الاستثمار الأولي لهذه الأنظمة أعلى من الوحدات التقليدية للتبريد. يمكن أن تكون أنظمة التبريد بالامتصاص أكثر تعقيدًا وتتطلب صيانة دورية، خاصة للمكونات مثل الماص، المكثف والمولد. من الضروري التأكد من بقاء هذه المكونات في حالة جيدة للحصول على أداء أمثل. يفتح التحليل الإكسرجو اقتصادي آفاقًا جديدة في تحليل تكاليف الأنظمة الطاقوية من خلال سد الفجوة بين الإكسرجي وتكلفة النظام. يأخذ التحليل الإكسرجو اقتصادي في الاعتبار تكلفة المعدات، التكاليف التشغيلية، تكلفة سائل العمل والتكاليف المرتبطة بتدمير الإكسرجي في النظام. الفكرة هي تطبيق هذا التحليل لدراسة نظام تبريد بالامتصاص يعمل بواسطة مصدر شمسي. يتعلق الأمر بدمج دراسة الديناميكا الحرارية للنظام مع تكاليف الاستثمار، التشغيل وتدمير الإكسرجي

**الكلمات المفتاحية :**

التبريد بالامتصاص الطاقة الشمسية، تحليل الطاقة الاقتصادية، الأداء، التكلفة، EES.

**Abstract :**

Solar absorption refrigeration systems can be an excellent solution for sustainable cooling, but they present some challenges. These systems tend to be less efficient than traditional mechanical compression refrigeration systems, especially during periods of low solar radiation. They often require larger collector areas to capture sufficient solar energy, which can increase installation costs and space requirements. The initial investment for these systems can be higher than for conventional refrigeration units. Absorption refrigeration systems can be more complex and require regular maintenance, particularly for components such as the absorber, condenser, and generator. It is essential to ensure that these components remain in good condition to achieve optimal performance. Exergoeconomic analysis opens a new avenue in the cost analysis of energy systems by bridging the gap between exergy and system cost. Exergoeconomic analysis takes into account equipment cost, operational costs, the cost of the working fluid, and the costs associated with the destruction of exergy in the system. The idea is to apply this analysis to study a solar-driven absorption refrigeration system. It involves combining the thermodynamic study of the system with the costs of investment, operation, and exergy destruction.

**Keywords :**

Refrigeration by solar absorption, exergo-economic analysis, performance, cost, EES.

**Résumé :**

Les systèmes de réfrigération à absorption solaire peuvent constituer une excellente solution de refroidissement durable, mais ils présentent quelques difficultés. Ces systèmes ont tendance à être moins efficaces que les systèmes de réfrigération traditionnels à compression mécanique, en particulier pendant les périodes de faible rayonnement solaire. Ils nécessitent souvent de plus grandes surfaces de capteurs pour capter suffisamment d'énergie solaire, ce qui peut augmenter les coûts d'installation et l'encombrement. L'investissement initial pour ces systèmes peut être plus élevé que pour les unités de réfrigération conventionnelles.

Les systèmes de réfrigération à absorption peuvent être plus complexes et nécessiter un entretien régulier, en particulier pour les composants tels que l'absorbeur, le condenseur et le générateur. Il est essentiel de veiller à ce que ces composants restent en bon état pour obtenir des performances optimales.

L'analyse exergoéconomique ouvre une nouvelle voie dans l'analyse des coûts des systèmes énergétiques en comblant le fossé entre l'exergie et le coût du système. L'analyse exergoéconomique prend en considération le coût de l'équipement, les coûts opérationnels, le coût du fluide de travail et les coûts liés à la destruction de l'exergie du système.

L'idée est d'appliquer cette analyse pour étudier une installation de réfrigération à absorption entraînée par une source solaire. Il s'agit de combiner l'étude thermodynamique du système avec les coûts d'investissement, d'opération et de destruction d'exergie.

**Mots clés :**

Réfrigération par absorption solaire, analyse exergo-économique, performance, le coût, EES.

# NOMENCLATURE

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>	
COP	Coefficient de Performance	-
$\dot{m}$	Bilan de masse	
w	puissance spécifique	
v	Volume spécifique	
P	Pression	
$\eta$	Rendement	
$\dot{w}$	Puissance totale consommée	
h	Enthalpie spécifique	
ex	Exergie spécifique	
T	Température	
s	Entropie spécifique	
$\dot{E}x_{dest}$	Taux de destruction d'exergie	
x	Concentration de la solution	
$\dot{Q}$	Chaleur	
$\dot{E}x_{th}$	Taux d'exergie thermique	
$\dot{C}$	Coût	
$\dot{Z}_{eq}$	Coût associé aux équipements	
$\dot{C}_{OPM}$	Coût à l'exploitation et à la maintenance	
$\dot{C}_{Cool}$	Coût au refroidissement	
$\dot{E}x_{OPM}$	Exergie transportée par l'énergie consommée en termes de chaleur et de puissance	

$c_{Cool}$	Coût du refroidissement produit
$\dot{E}x_{Cool}$	Exergie associée au refroidissement produit
$c_{OPM}$	Coût d'exploitation et de maintenance
Eff hx	Efficacité d'échangeur
UA	Coefficient global de transfert de chaleur
<b>Indices :</b>	
a	Absorbeur
c	Condenseur
e	Evaporateur
g	Générateur
p	Pompe
evw	Vanne d'expansion ( <b>pour la solution faible</b> )
evr	Vanne d'expansion ( <b>pour le réfrigérant</b> )
hx	Echangeur de chaleur
en	Energétique
ex	Exergétique
R.P.A	Réfrigeration par absorption
R.P.A.S	Réfrigeration par absorption solaire

# Introduction Générale

## Introduction générale :

Depuis la révolution industrielle, la quête de l'humanité pour un mode de vie amélioré et un confort accru s'est considérablement intensifiée. Pour répondre à ces exigences, une multitude de dispositifs technologiques et de produits consommateurs d'énergie sont lancés presque chaque jour. À l'échelle mondiale, la demande en énergie nécessaire aux applications de chauffage et de refroidissement a connu une hausse spectaculaire et devrait continuer de croître de façon exponentielle, rendant difficile pour les pays de satisfaire cette demande croissante. Actuellement, la majorité des centrales énergétiques fonctionnent à partir de combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, principalement en raison de leur disponibilité aisée et de leur coût réduit dans certains pays, notamment dans la région du Golfe. Cependant, ces systèmes émettent des gaz toxiques, comme le CO<sub>2</sub> et les NO<sub>x</sub>, qui sont nocifs non seulement pour l'environnement, mais aussi pour tous les êtres vivants. La quantité maximale d'énergie disponible dans le réseau des pays situés dans des régions chaudes ou froides est utilisée pour assurer le refroidissement ou le chauffage, respectivement, en mettant en place des cycles de compression de vapeur conventionnels gourmands en énergie. Ces cycles consomment une quantité considérable d'énergie pour faire fonctionner le compresseur afin d'atteindre le taux de refroidissement ou de chauffage requis par le système. Cette consommation élevée d'énergie affecte non seulement l'environnement mais aussi les individus en termes de coûts de fonctionnement. Il est donc devenu crucial de concevoir des systèmes de climatisation, de refroidissement et de réfrigération plus économiques, plus écologiques et pouvant être alimentés par des sources de chaleur de basse qualité, telles que l'énergie solaire, géothermique, la biomasse, ainsi que la chaleur issue de processus ou de déchets. La performance d'un tel cycle de refroidissement est représentée par le coefficient de performance (COP), qui est le rapport entre la quantité de refroidissement fournie et l'entrée d'énergie dans le système [1].

L'avènement des énergies renouvelables, surtout avec l'énergie solaire qui brille en tête de liste, c'est comme un grand pas vers un avenir où notre énergie serait plus respectueuse de la planète. Avec l'urgence climatique qui nous presse et la nécessité de larguer les énergies fossiles, le solaire s'impose comme la voie à suivre. C'est illimité et ça bouscule considérablement moins l'environnement, alors forcément, c'est la solution pour répondre à nos besoins en énergie tout en serrant la vis aux émissions de gaz à effet de serre.



En même temps, les systèmes de réfrigération à absorption, de plus en plus importants dans cette transition énergétique, jouent un rôle crucial. Ils utilisent la chaleur qui vient des énergies renouvelables, comme le soleil, pour nous offrir une alternative durable et efficace aux méthodes de réfrigération classique. Non seulement ils gardent des aliments, médicaments et autres trésors à des températures optimales, mais en plus, ils le font de manière respectueuse l'environnement.

Et puis, voir de plus en plus de ces systèmes dans tous les secteurs, de l'agroalimentaire à la santé, et même chez nous à la maison, ça montre bien leur pertinence et leur efficacité. En misant intelligemment sur le soleil et en aidant à réduire notre demande d'électricité provenant des sources non renouvelables, ces systèmes jouent rôle essentiel de transition vers un système énergétique plus vert et équilibré.

La combinaison entre les énergies renouvelables, avec les systèmes de réfrigération à absorption, on a un aperçu excitant de ce que notre futur énergétique pourrait être. En utilisant intelligemment les ressources renouvelables et en adoptant des technologies qui préserver la nature, on trace la voie pour créer un monde où l'énergie est durable, fiable, et accessible à tout le monde.

Ce système est une bonne option pour la réfrigération par ce que Les réfrigérants (l'ammoniac, l'eau et le méthanol) sont respectueux de l'environnement., C'est une solution efficace dans les zones isolées qui ne sont pas connectées avec réseau électrique [2], Répond aux besoins critiques de la population de ces zones, par exemple la production de glace pour la conservation des aliments et le stockage des vaccins [3], Il fonctionne sans utilisation de lubrifiants synthétiques, tels que les esters de polyol [4], La conception de cette machine est flexible, permettant un fonctionnement avec un maximum de fonctionnalités [5].

L'efficacité énergétique dans les systèmes de réfrigération est devenue une priorité absolue en raison de plusieurs facteurs clés liés à la consommation énergétique, à l'environnement, Et aux coûts opérationnels. Le domaine de la production du froid offre un bon potentiel pour réaliser des gains au niveau de l'efficacité énergétique . En moyenne, une augmentation de 1 % de l'efficacité des systèmes de réfrigération au Canada permettrait d'économiser 270 mégawatts d'électricité. Cette amélioration équivaut à une économie annuelle de 1,3 million de barils de pétrole et à une réduction correspondante des émissions de gaz à effet de serre [6].

Après, l'utilisation de l'analyse exergoéconomique comme outil d'évaluation ouvre une nouvelle perspective dans l'analyse des coûts des systèmes énergétiques en comblant le fossé entre l'exergie et le coût du système. Cette approche prend en compte le coût de l'équipement, les coûts opérationnels, le coût du fluide de travail, ainsi que les coûts liés à la destruction d'exergie du système [7].

Les systèmes solaires offrent un impact environnemental positif à plusieurs niveaux. En produisant de l'électricité sans émissions de gaz à effet de serre, ils contribuent à atténuer le changement climatique et à améliorer la qualité de l'air. De plus, en utilisant une ressource renouvelable et abondante, le soleil, ils préservent les ressources naturelles pour les générations futures. Les installations solaires réduisent également la pression sur les ressources en eau douce, créent des emplois verts qualifiés, et favorisent l'indépendance énergétique locale. Avec leur longue durée de vie et leur recyclabilité, les systèmes solaires sont une solution durable et cruciale pour un avenir énergétique propre et respectueux de l'environnement [8].

# **Chapitre I**

## Généralité sur le système de réfrigération par absorption solaire

## **Chapire I :**

### **I.1.Introduction :**

Les inquiétudes liées à l'effets nocifs de l'utilisation des combustibles fossiles pour la production d'énergie ont poussé pour le développement d'un système de réfrigération capable de fonctionner avec une énergie de bas grade et pouvant minimiser l'utilisation de puissance dans le processus de refroidissement comme réfrigération par absorption.

Ce chapitre présente la combinaison entre l'énergies solaire avec les systèmes de réfrigération, en particulier les systèmes de réfrigération a absorption et leur statistique économique, son composant, principe de fonctionnement, comparaison avec système de compression et comment effectuer une analyse exergoéconomique.

### **I.2. L'histoire des systèmes de réfrigération à absorption :**

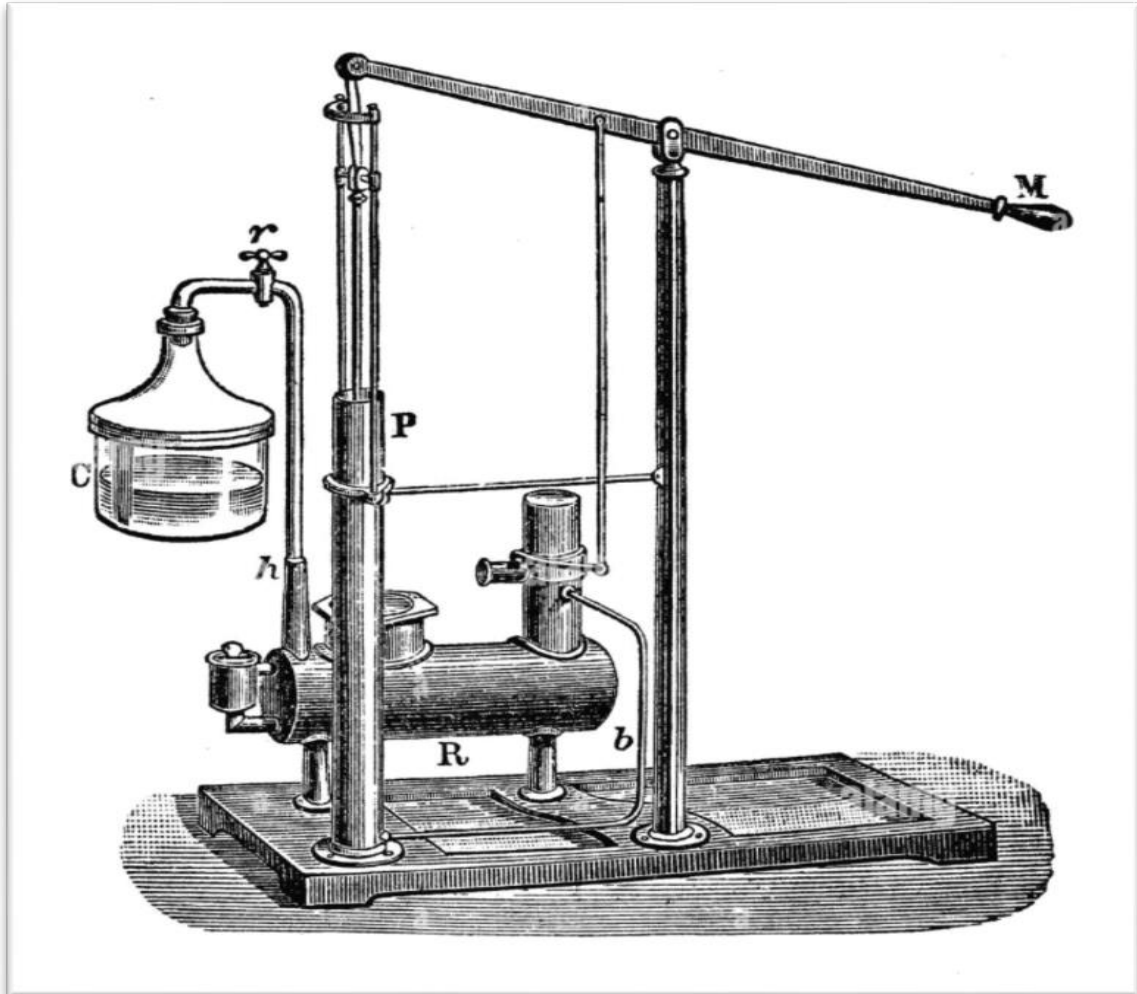
En 1850 Edmond Carré développé la première machine de réfrigération par absorption, Il utilisait l'eau et l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) comme fluide de travail, (figure.I.1), une grande quantité de ( $H_2SO_4$ ) absorber une petite quantité de vapeur [9].

En 1859, le français Ferdinand Carré a breveté la première machine à absorption, il a choisi un autre fluide de travail (ammoniaque-eau avec l'eau comme absorbant) a raison de stabilité et bas point d'ébullition  $44^\circ C$  [10].

En 1880, l'entreprise « Entreprise de machines Linde » a introduit la première installation à compression de vapeur, ce qui a graduellement relégué la machine à absorption, dans les années 20 un renouveau significatif grâce aux améliorations de Merkele, Altenkich, Niebergall et Bosniakovic sur l'aspect pratique et théorique [11].

En 1913 Edmund Altenkirch commencé l'étude thermodynamique des systèmes de réfrigération à absorption tout au long de la première moitié du XXe siècle.

En 1940, une machine d'absorption eau-bromure (utilise l'eau comme réfrigérant) de lithium a été développée en États-Unis, où l'eau est le fluide frigorigène, ce type de système est basé sur un cycle carré modifié et a été largement utilisé dans le domaine de la climatisation [12].



*Figure I-1 : La première machine à réfrigération par absorption utilisant de l'eau et de l'acide sulfurique [13]*

### **I.3. Energie solaire en système de réfrigération**

#### **I.3.1 Généralités sur l'énergie solaire :**

Sur Terre, l'énergie solaire est la forme d'énergie la plus abondante. C'est une énergie qui peut se transformer en chaleur ou en électricité, respectivement par des panneaux solaires thermiques et des cellules photovoltaïques [14].

L'énergie solaire se présente comme une alternative prometteuse aux autres sources d'énergie, chaque année la Terre reçoit plus de 3000 heures de lumière solaire, avec un

\_\_\_\_\_ Généralité sur le système réfrigération à absorption entraîné par une source solaire  
niveau d'éclairement élevé. Quand en optimisant les angles de réception (figure I.2), la moyenne quotidienne annuelle est de 5 à 7 kWh /m<sup>2</sup>/jour.

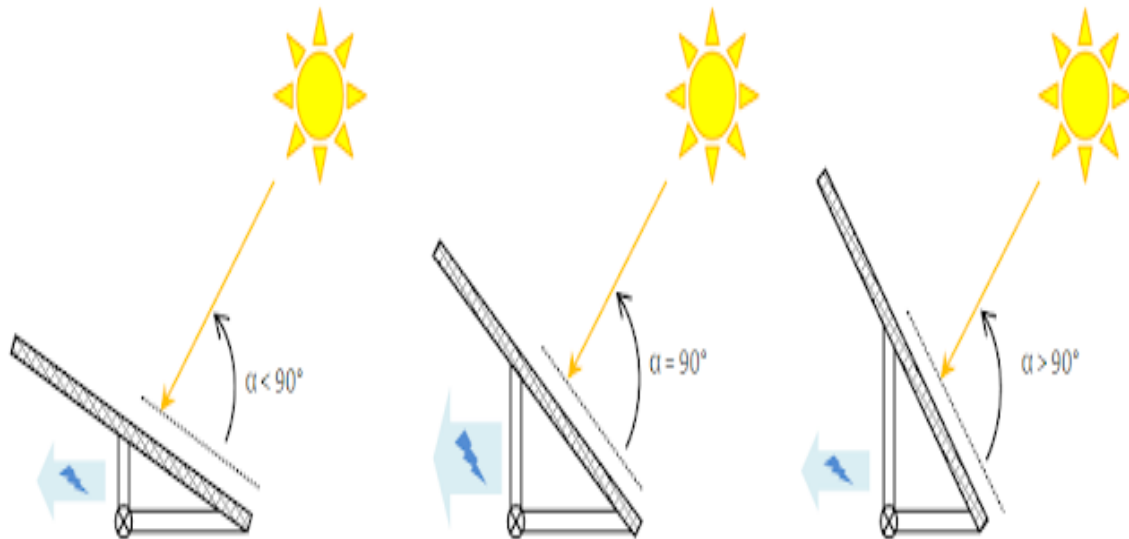


Figure I-2: : Inclinaison de 90° par rapport aux rayons du soleil (au centre) = production optimale [15]

### I.3.2 L'énergie solaire et à produire du froid :

Le rafraîchissement solaire terme antinomique, consiste à produire du froid à partir de l'énergie solaire, son intérêt est immédiat, il réside dans la simultanéité de la demande de froid et de l'ensoleillement cf. (Figure I.3). Lorsque la chaleur nécessaire au fonctionnement de la machine frigorifique est fournie par le soleil, le froid fourni est gratuit [16].

Cette idée d'adéquation entre ensoleillement et utilisation de cette énergie solaire est très importante.

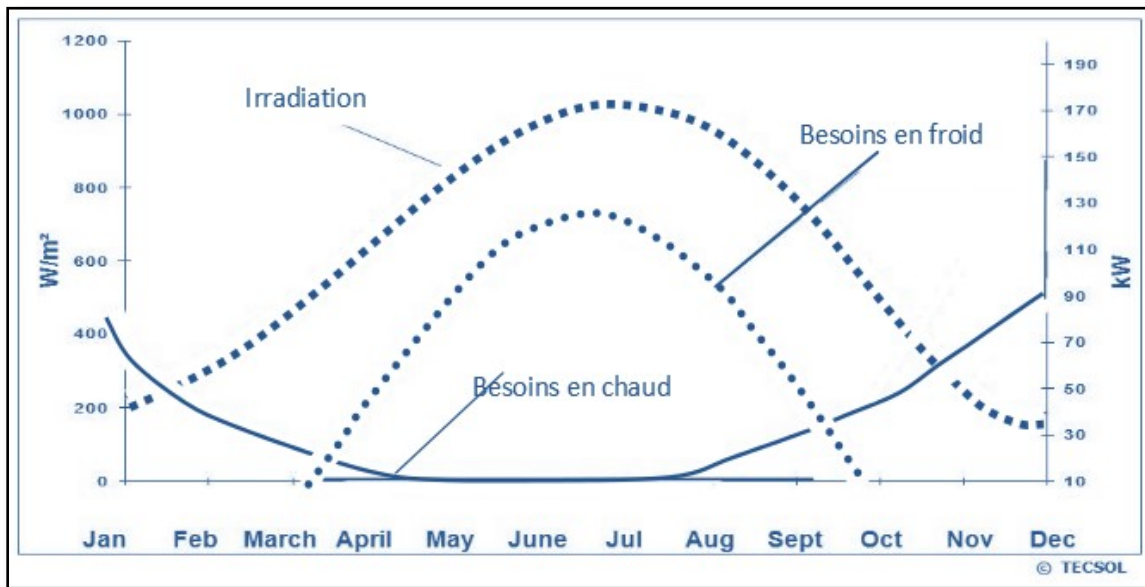


Figure I-3 : Adéquation entre la présence de soleil et besoin en climatisation [16]

#### I.4. Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes de réfrigération :

L'utilisation de l'énergie solaire pour la production de froid répond aux préoccupations de l'économie d'énergie ainsi qu'à certains besoins dans les pays en voie de développement et surtout dans le secteur rural.

Il existe plusieurs voies d'utilisation de l'énergie solaire pour produire du froid, basée sur l'emploi de l'électricité (filères photovoltaïque), ou sur l'utilisation d'un procédé thermomécanique (filères utilisant l'énergie mécanique), ou sur l'utilisation d'un procédé thermodynamique (filères utilisant l'énergie thermique [17])

Toutes les technologies utilisées sont listées dans la Figure (I.4)

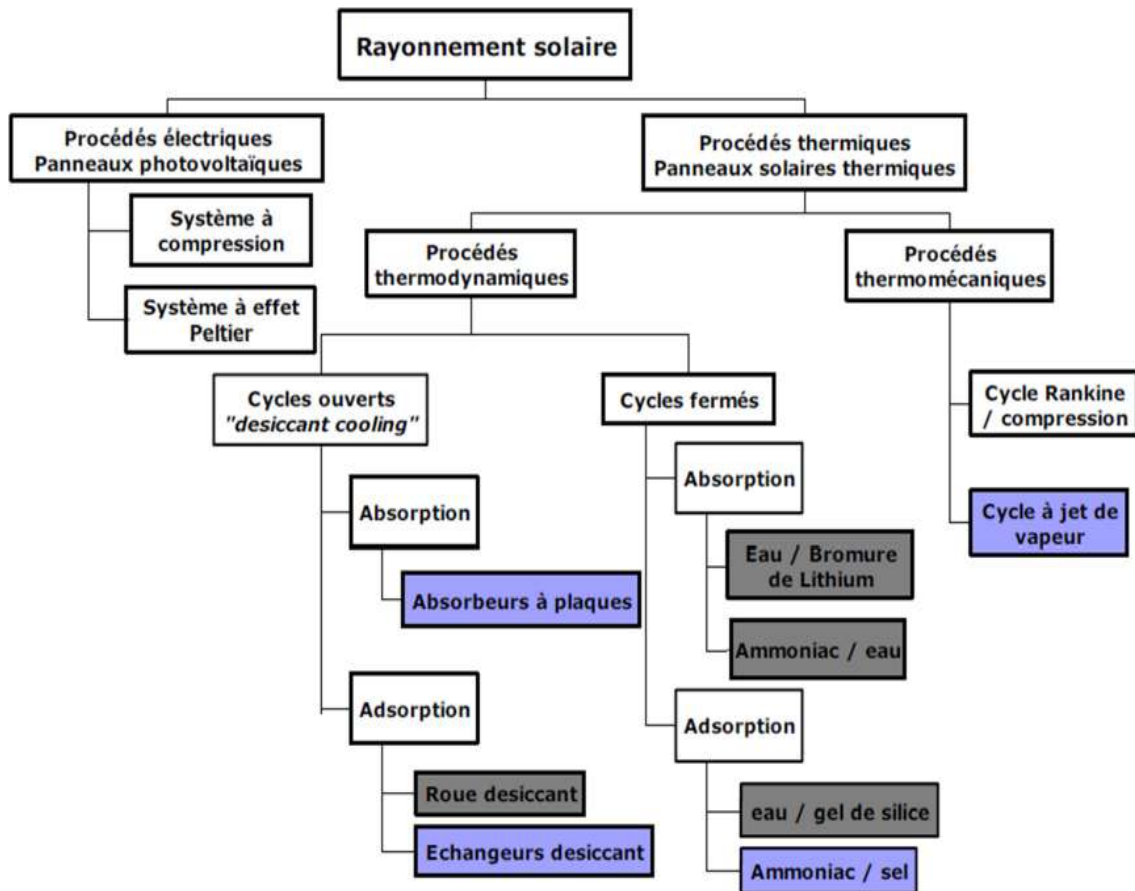


Figure I-4: : Différentes technologies de production du froid à partir de l'énergie solaire [18]

#### I.4.1 Système de Refroidissement Solaire Photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques (PV) sont des dispositifs semi-conducteurs utilisant la lumière solaire pour produire de l'électricité en courant continu. Avec la croissance de la demande d'énergie propre, l'utilisation des modules PV a explosé. Cependant, leur production en courant continu pose problème car la plupart des appareils utilisent le courant alternatif. Pour un système de refroidissement solaire PV efficace, un système intégré avec des panneaux PV, une batterie de stockage, un onduleur et une unité de climatisation est nécessaire. Les cellules PV alimentent la batterie en courant continu, qui est ensuite converti en courant alternatif pour alimenter l'unité de climatisation lorsque la lumière solaire est



faible. Cette dernière dépend de l'électricité pour fonctionner et fournir le refroidissement requis [1].

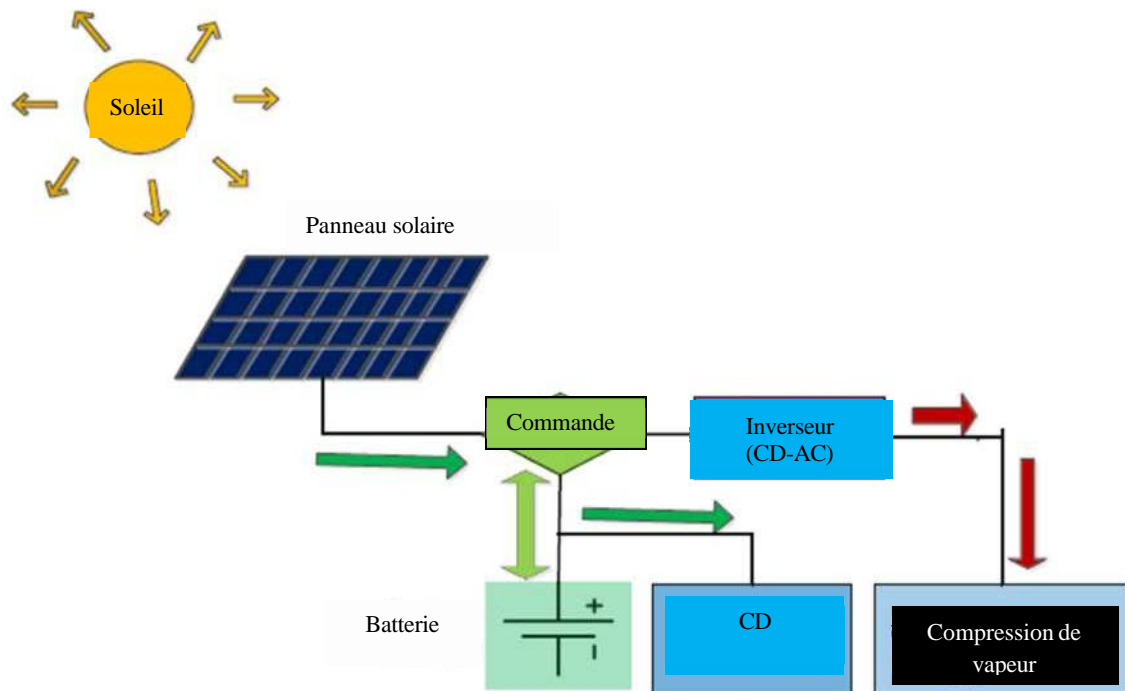


Figure I-5: Système de Refroidissement Solaire Photovoltaïque [19]

#### I.4.2 Système de Refroidissement Solaire Thermo-voltaïque :

Les systèmes de refroidissement solaire thermo-voltaïque utilisent le principe du refroidissement Peltier, convertissant l'énergie solaire en électricité via l'effet thermoélectrique pour produire du froid. Ces dispositifs sont composés de thermocouples niveau. Les recherches, notamment celles de Vella et al. (1976), ont montré l'intérêt des générateurs thermoélectriques utilisant l'énergie solaire pour la climatisation. Ces systèmes utilisent un gaz électronique comme fluide de travail, ce qui les rend uniques et respectueux de l'environnement, par opposition aux chlorofluorocarbones. Des efforts de recherche visent à développer des systèmes de refroidissement thermoélectriques avec un coefficient de performance comparable à celui des systèmes conventionnels pour exploiter cette technologie de conversion d'énergie solide [1].

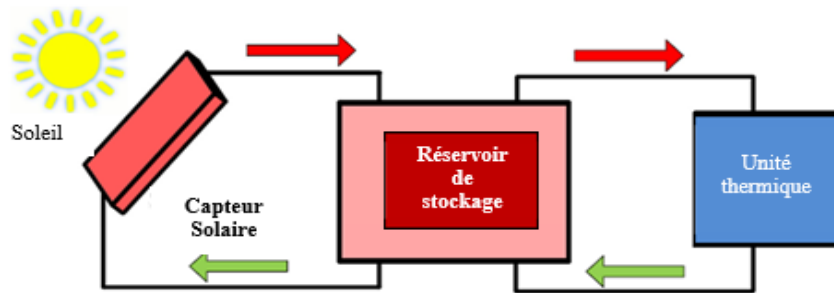


Figure I-6: Système de Refroidissement Solaire Thermo-voltaïque [19]

### I.4.3 Système de refroidissement Thermo-Mécanique :

Le système de refroidissement thermomécanique utilise l'énergie thermique pour produire du refroidissement, et le système à éjecteur de vapeur en est un exemple. Ce système, lorsqu'il est intégré à un collecteur solaire thermique ou à une source géothermique, devient respectueux de l'environnement grâce à l'utilisation d'énergies renouvelables. La vapeur provenant de ces sources est acheminée vers une chaudière, qui produit de la vapeur à haute température. Cette vapeur passe ensuite par un éjecteur où sa pression diminue, créant un mélange eau-vapeur à basse pression. Ce mélange traverse un évaporateur pour extraire de la chaleur de l'eau qui y circule. Un avantage notable de ce système est qu'il peut également fonctionner comme une turbine pour produire de l'électricité pendant les périodes de faible demande de refroidissement [1].

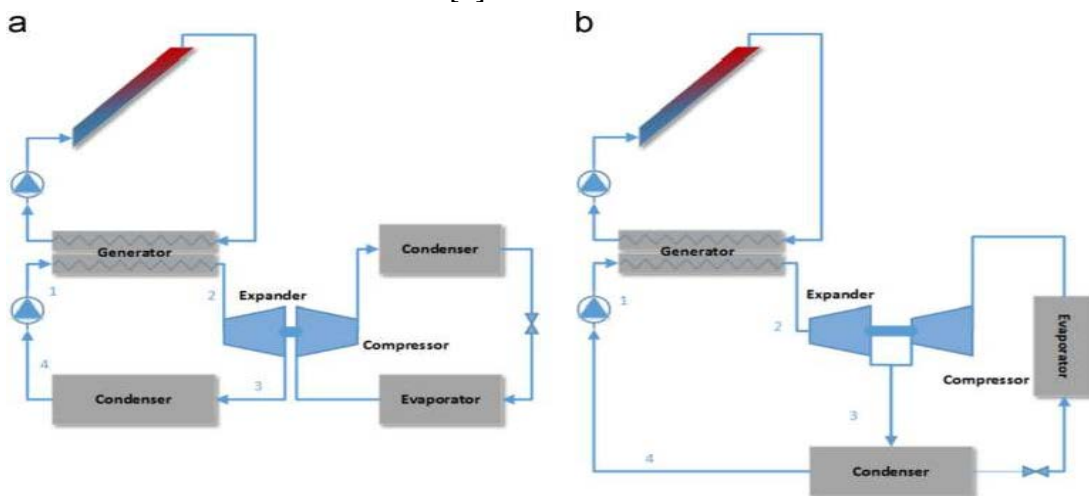


Figure I-7 : Machine frigorifique basée sur un processus thermomécanique (a) le cycle séparé, (b) le cycle intégré [20]

#### I.4.4 Système de Refroidissement par Adsorption :

Le processus d'adsorption dans les systèmes de refroidissement utilise une surface solide poreuse avec une grande capacité adsorptive. Les performances de ces systèmes dépendent fortement des fluides de travail utilisés, comme le gel de silice-eau, le charbon actif-méthanol, et la zéolite-eau. Un système d'adsorption standard comprend un lit d'adsorbant, un évaporateur et un condenseur. Les énergies renouvelables peuvent facilement fournir l'énergie thermique nécessaire à ces systèmes, les rendant écologiques. Le coefficient de performance (COP) varie selon le fluide de travail : de 0,1 à 0,12 pour la zéolite-eau, 0,05 pour le charbon actif-ammoniac, et de 0,096 à 0,13 pour des applications de stockage à froid des grains selon une étude de Luo et al [1].

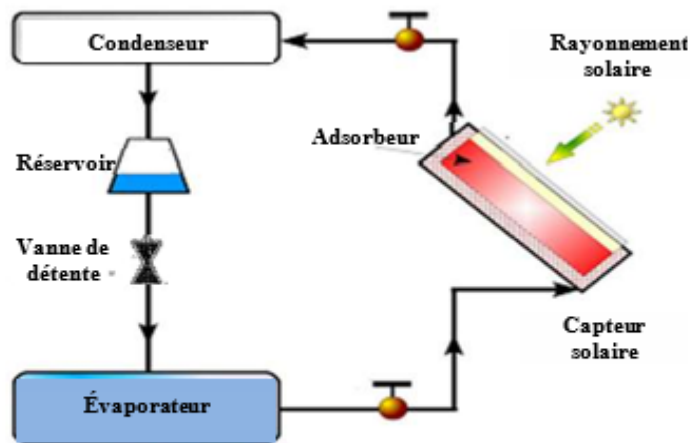


Figure I-8: Schéma d'une machine frigorifique solaire à adsorption [21]

#### I.5. Exemples d'application dans les systèmes de réfrigération solaire :

L'intégration de l'énergie solaire dans les systèmes de réfrigération offre une gamme d'applications pratiques. Voici quelques exemples concrets d'application de l'énergie solaire dans les systèmes de réfrigération :

- Réfrigération pour le Stockage des Aliments.
- Climatisation Solaire pour les Bâtiments.

- Réfrigération Solaire pour les Applications Médicales.
- Systèmes de Climatisation Solaire pour les Véhicules.
- Systèmes de Réfrigération Solaire pour les Installations de Stockage.
- Climatisation Solaire pour les Serres Agricoles
- Systèmes de Réfrigération Solaire pour les Zones de Loisirs

## **I.6. Intérêt de la production de froid par absorption et statistique économique :**

Le COP donne une idée de l'efficacité énergétique d'un cycle frigorifique , le COP d'une machine frigorifique à absorption à simple effet se situe généralement entre 0.7 et 1 contrairement à une machine classique une machine à absorption peut être alimentée par des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, Ce qui fait d'elle une option attrayante et en plus elle évite l'utilisation de fluides nocifs Malgré un cout d'investissement élevée pour les machines à absorption de petite puissance ,en raison choix limité des fabricants et des puissances disponibles.il est crucial de mener des étude comparative des cout totaux ( investissement, maintenance et exploitation) pour aider les maitres d'ouvrage les clients à faire des éclaircs choix .

Prix moyen d'un climatiseur électrique de 4.5 kWref est de 2000€et pour une machine frigorifique à absorption de la même puissance le prix s'élève à 9500€ [22]

Figure (**I.9**) (en 2007) montrer la domination de la technique du refroidissement par absorption sur le marché avec autre technique adsorption, froid par dessiccation solide et froid par dessiccation liquide [20].

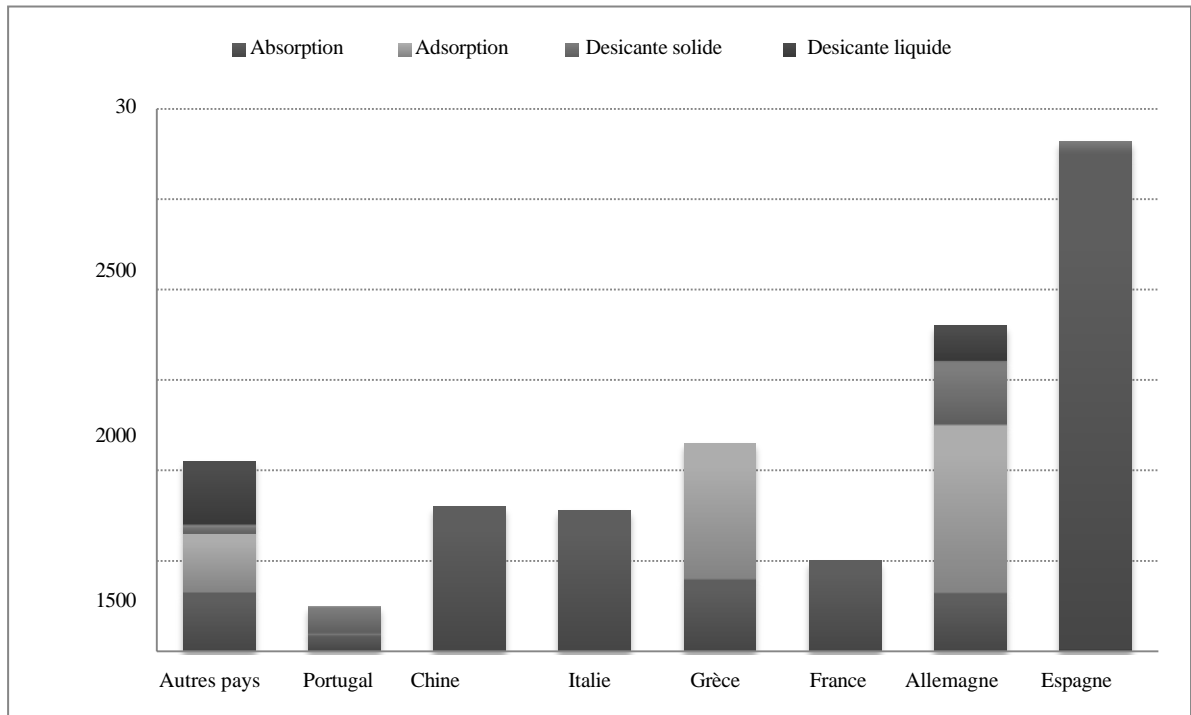


Figure I-9: Distribution mondiale de la puissance frigorifique assisté par l'énergie solaire (source [23])

### I.7. Les aspects économiques des systèmes de climatisation solaire :

La plupart des projets solaires de climatisation en sont encore au stade de la recherche ou de la démonstration, nécessitant des efforts supplémentaires de conception et de planification pour leur mise en œuvre. La production limitée de composants spécialisés entraîne des coûts d'investissement plus élevés par rapport aux systèmes conventionnels. Cependant, les systèmes de rafraîchissement à énergie solaire soutiennent la protection de l'environnement en économisant de l'énergie primaire et en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre [16].

La (Figure II.15) (chiffres comprennent les coûts dispositif de rejet de chaleur, c'est à dire, l'air de refroidissement ou d'une tour de refroidissement, mais n'inclut pas le coût d'installation) montre à titre d'exemple les coûts d'investissement pour différents types de refroidisseurs en fonction de la puissance de refroidissement installée.

Pour les systèmes de refroidissement à dessiccation utilisant une roue de sorption pour la déshumidification, la plage du coût moyen d'investissement est de 5 € à 10 € par m<sup>3</sup> / h d'alimentation nominale de débit d'air (sans système solaire thermique). Le prix dépend fortement du taux de débit d'air nominal du système qui est proportionnel directement à sa

\_\_\_\_\_ Généralité sur le système réfrigération à absorption entraîné par une source solaire

section transversale de la roue dessiccante (Fraunhofer : Institut solaire énergie système)  
[16].

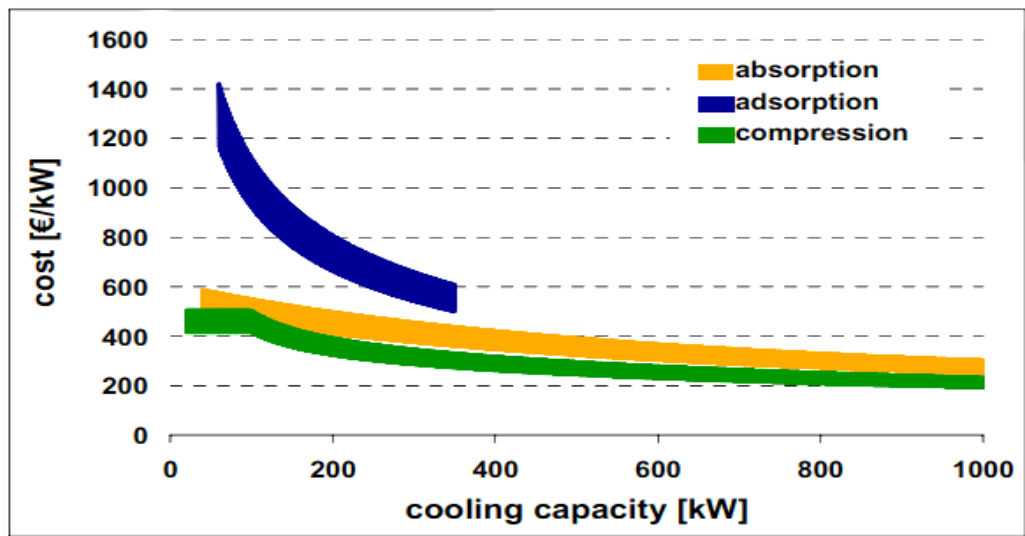


Figure I-10: Plage des coûts spécifiques pour les différents types de refroidisseurs en fonction de la puissance de refroidissement [16]

### I.8. Composants de Machine à absorption :

Un système de réfrigération à absorption par source solaire comprend généralement huit composants qui sont :

- Le générateur
- L'absorbeur
- Le condenseur
- L'évaporateur
- La pompe
- Une vanne d'expansion
- Echangeur de chaleur
- Capteur solaire

### I.8.1 Evaporateur :

C'est un dispositif conçu pour abaisser la température de l'air extérieur en utilisant un fluide frigorigène. Lorsqu'il traverse l'évaporateur, le fluide frigorigène subit un changement d'état de liquide à gazeux.

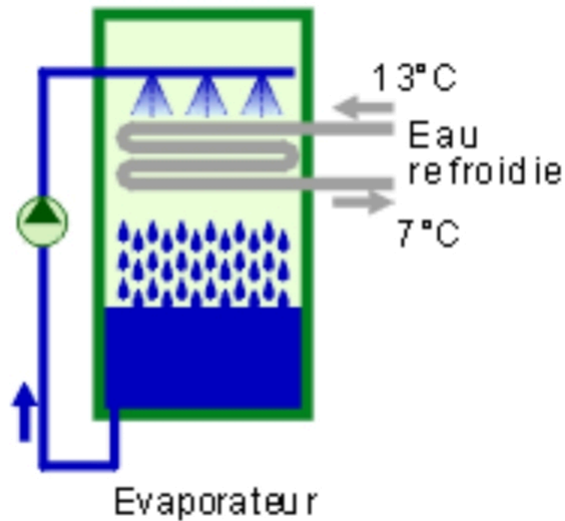


Figure I-11: Schéma de Evaporateur [24]

### I.8.2 Absorbeur :

L'absorbeur c'est un composant qui renferme la solution absorbante qui est continuellement pompée vers le bas du récipient pour y être arrosée, la solution absorbante absorbe la vapeur d'eau de l'évaporateur, et y maintient ainsi la basse pression requis pour la vaporisation de réfrigérant [24].

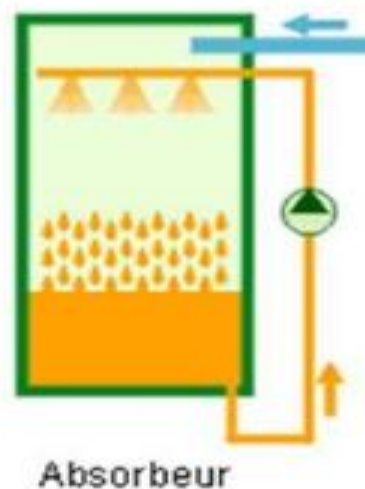


Figure I-12 Schéma d'absorbeur [24]

### I.8.3 Désorbeur :

Appelé aussi générateur ou bouilleur, C'est un dispositif fait le travail contraire de l'absorbeur. Le désorbeur est chauffé de façon à bouillir la solution et séparer Frigorigène de la solution [24].

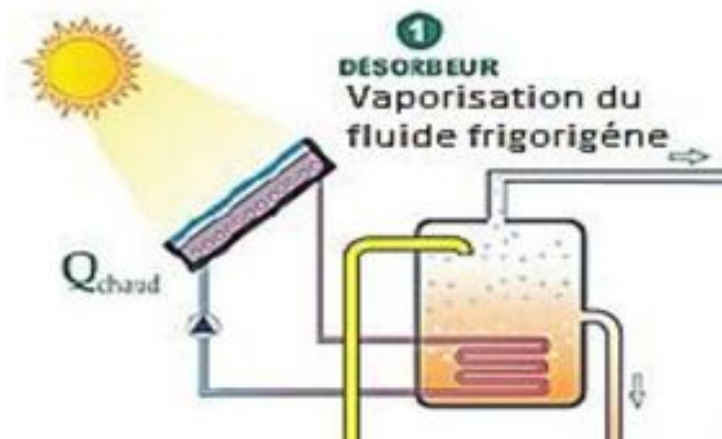


Figure I-13: Schéma de Désorbeur [25]

### I.8.4 Condenseur :

Joue un rôle crucial en refroidissant le réfrigérant provenant du générateur où le réfrigérant vaporisé cède sa chaleur à l'eau de refroidissement.

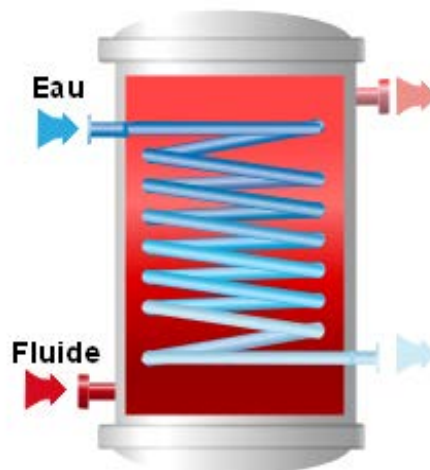


Figure I-14: Schéma de Condenseur



### I.8.5 Le détendeur :

Est la partie du circuit dans laquelle le fluide frigorigène va perdre sa pression. Il produit un effet inverse de celui du compresseur. Le détendeur est un élément passif du circuit frigorifique mais essentiel pour réaliser le cycle de compression/détente permettant de transférer les calories ou frigories de l'évaporateur au condenseur

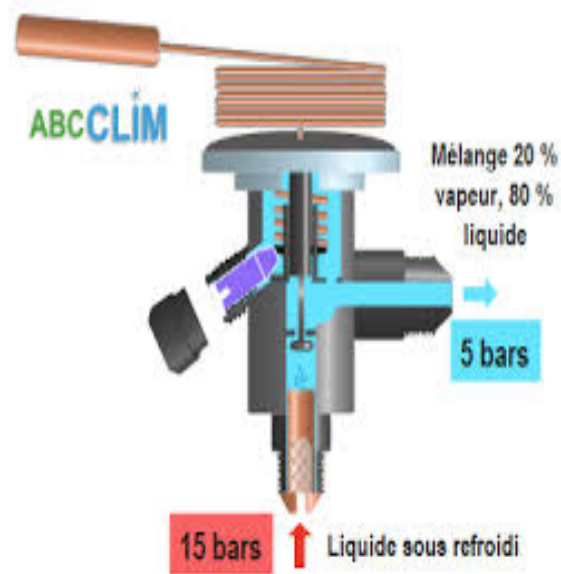


Figure I-15: Schéma de Détendeur [26]

### I.8.6 Pompe :

Machine propre à élever ou à refouler un fluide [27].

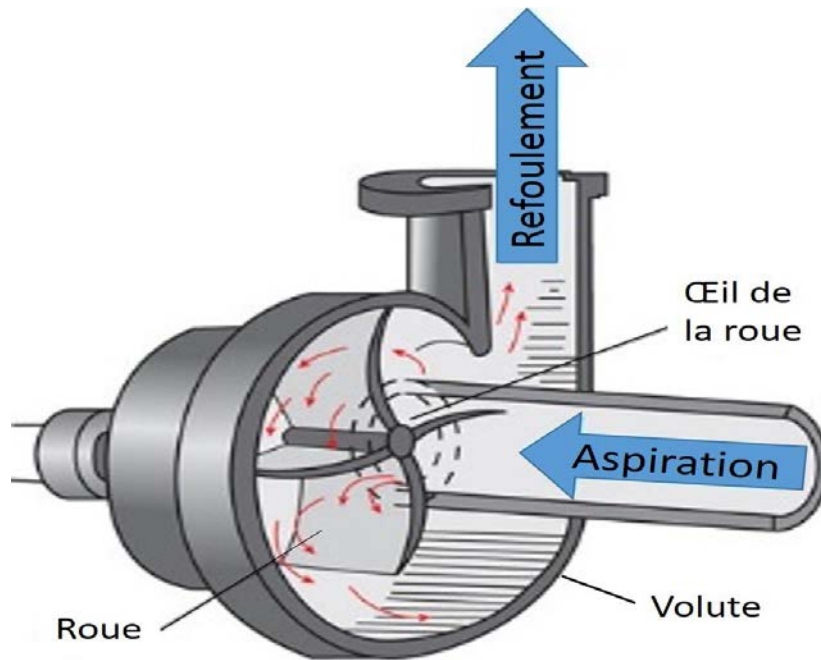


Figure I-16 : Schéma de Pompe [28]

### I.8.7 Echangeur de chaleur :

Les échangeurs de chaleur sont des appareils autorisant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. En plupart des cas, les fluides ne sont pas en contact [29].

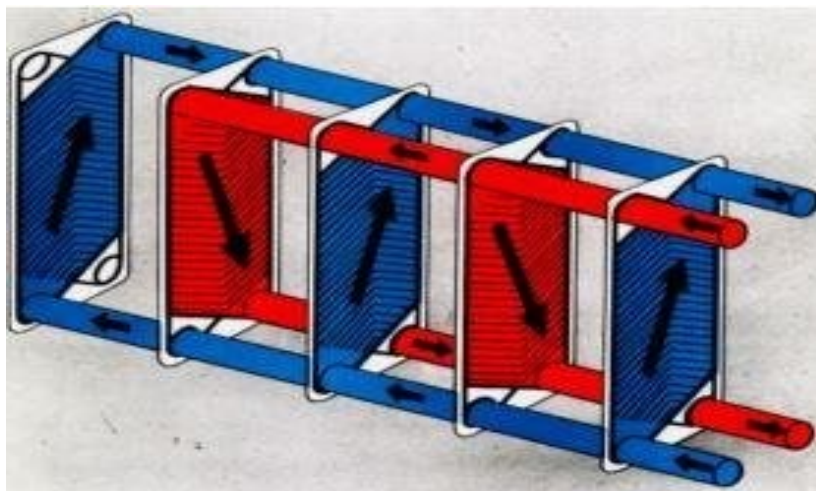


Figure I-17: Echangeur de chaleur à plaque [30]

### 1.8.8 Capteur solaire :

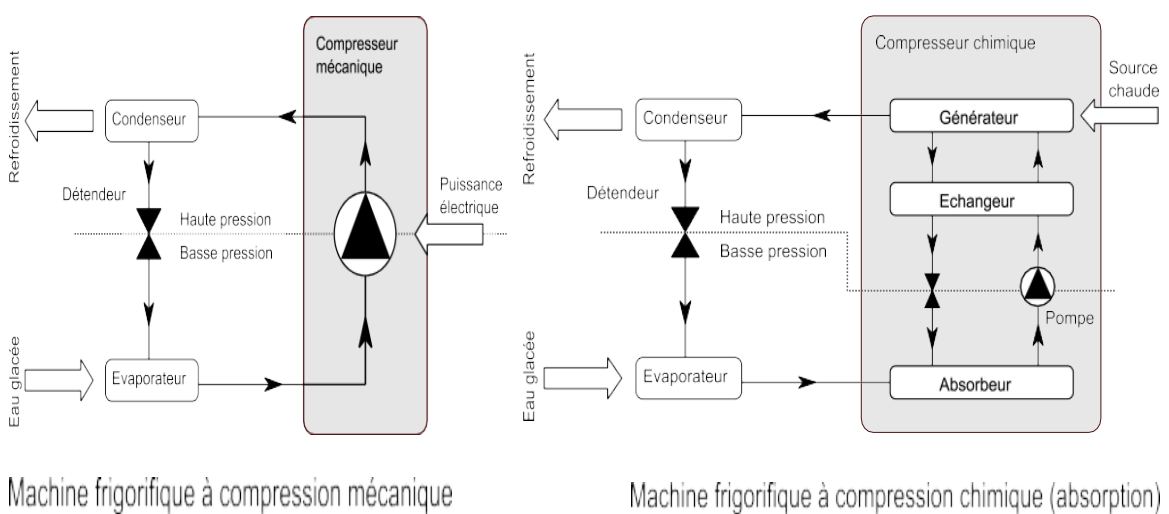
Un capteur solaire thermique est un dispositif qui transforme le rayonnement solaire à l'aide un fluide caloporteur en énergie thermique [31].



Figure I-18: capteur solaire thermique plan [32]

### 1.9. Comparaison entre la machine frigorifique à absorption et celle à compresseur mécanique :

Les systèmes frigorifiques à absorption présentent de nombreuse similitude avec les systèmes classiques (à compression mécanique), il y a un condenseur, un évaporateur et un détendeur (Figure I.19) [14].

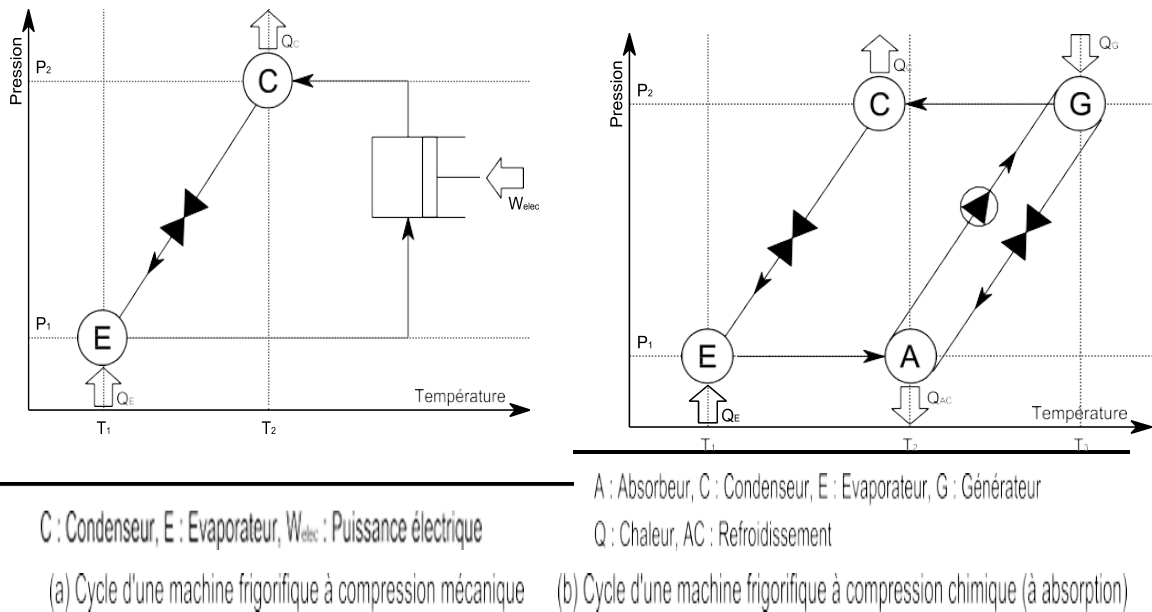


Machine frigorifique à compression mécanique

Machine frigorifique à compression chimique (absorption)

Figure I-19: Comparaison entre les systèmes de refroidissement à absorption et ceux à compression mécanique [14]

Les deux systèmes semblent être similaires sauf de la section de compression représentée par rectangle gris, un compresseur chimique au lieu du compresseur mécanique à moteur électrique. A la différence de ce dernier, le cycle de compression chimique utilise un couple frigorigène-absorbant comme (LiBr) et d'eau (H<sub>2</sub>O), ou de l'eau (H<sub>2</sub>O) et (NH<sub>3</sub>). Il est essentiel que le cycle de compression chimique soit maintenu sous vide, certaines machines peuvent avoir une pompe permettant un tirage au vide permanent, entraîne une augmentation de la consommation électrique totale de la machine [14].



*Figure I-20 : Diagramme de Dühring pour les cycles frigorifiques à compression mécanique et à compression chimique (source : [33])*

Le diagramme de Dühring est un outil pratique pour comprendre le comportement d'une solution dans diverses conditions lors d'un processus sous vide, dans (figure) le cycle à compression mécanique comporte deux niveau de température distincts T1 et T2, et le cycle de compression chimique inclut un niveau de température supplémentaire T1, T2 et T3. Le premier est appelé un générateur thermodynamique ditherme et le deuxième un générateur thermodynamique tritherme [14].

### I.9.1 Les avantages et inconvénients par rapport aux systèmes classiques :

On cite certain avantages et inconvénients des systèmes à absorption comparés aux systèmes à compression dans le Tableau.I.1 :

Tableau I-1: Les avantages et inconvénients par rapport aux systèmes classiques.

<u>Systèmes à compression</u>	<u>Systèmes à absorption</u>
<p style="text-align: center;"><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>* très bon coefficient de performance</li><li>* simplicité du cycle et de machine</li><li>* bonne sécurité d'emploi, mais avec les frigorigènes actuels qui sont mis en accusation</li><li>* variation de puissance frigorifique facile à mettre en oeuvre</li></ul>	<p style="text-align: center;"><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>* consomme essentiellement de l'énergie calorifique qui peut être récupérée d'un autre système</li><li>* ne nécessite que peu de machines tournantes</li><li>* peu de maintenance et grande longévité du matériel</li></ul>
<p style="text-align: center;"><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>* l'énergie consommée par ces systèmes est coûteuse</li><li>* utilisation d'une machine tournante entraînant des bruits et maintenance fréquente</li><li>* problèmes posés par certains frigorigènes, polluants, dont la production est bannie par le protocole de Montréal.</li></ul>	<p style="text-align: center;"><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>* coefficients de performance modestes</li><li>* une grande puissance thermique est à évacuer vers l'extérieur</li><li>* étanchéité de la machine pour éviter l'intrusion de gaz incondensables</li><li>* problème de cristallisation des absorbants</li></ul>

### I.10. Principe de fonctionnement machine frigorifique à absorption :

La technique de réfrigération solaire par absorption (*Figure.I.21*) repose sur un processus thermique qui exploite les différences d'affinités entre deux substances en fonction de leurs conditions thermodynamiques telles que la pression, la température et la concentration. L'absorption se produit lorsque deux fluides (liquide-liquide ou liquide-vapeur) manifestent une forte affinité l'un pour l'autre. Dans ce système, une solution contenant à la fois un fluide de réfrigération (le réfrigérant) et un absorbant est utilisée comme fluide de travail, ces deux composants ayant une forte affinité l'un pour l'autre [1].

Le processus commence par chauffer une solution saline de faible concentration d'absorbant dans le désorbeur (ou générateur) à l'aide de la chaleur motrice. Cela entraîne la libération d'eau sous forme gazeuse, qui se condense ensuite dans le condenseur, augmentant ainsi la concentration de la solution saline. Pendant ce temps, le réfrigérant se vaporise dans l'évaporateur puis est absorbé par la solution concentrée dans l'absorbeur [1].

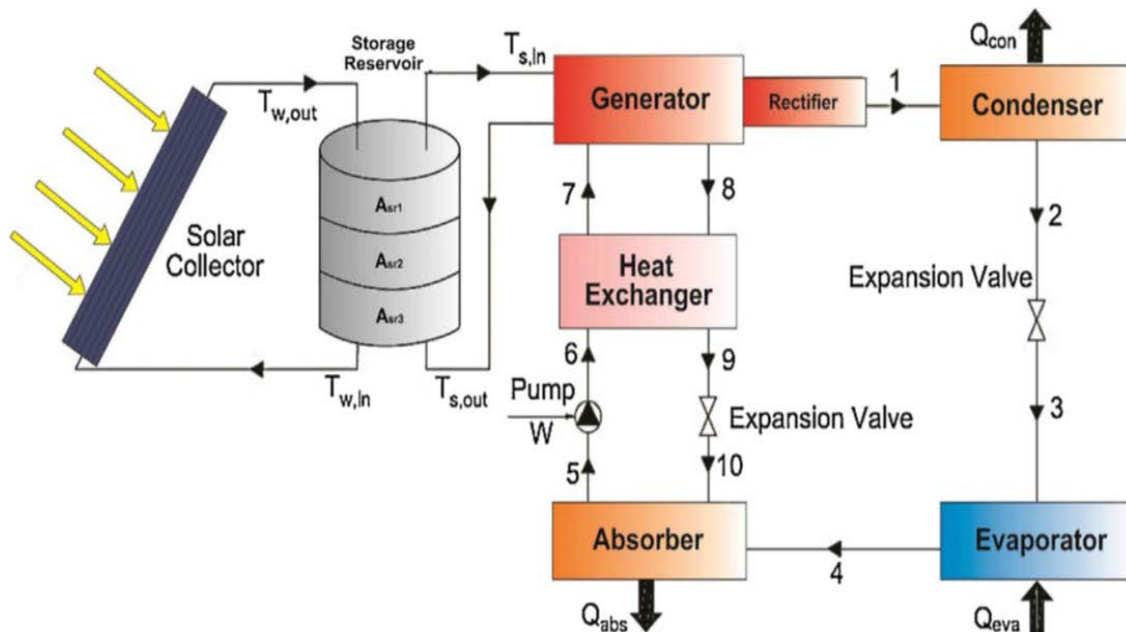


Figure I-21: Schéma d'une machine réfrigération solaire à absorption

L'absorption est un processus exothermique qui est moins favorable à des températures élevées. Pour cette raison, un dispositif de dissipation de chaleur, généralement une tour de refroidissement humide, est utilisé pour évacuer la chaleur générée dans l'absorbeur et le condenseur. De plus, un échangeur de chaleur entre l'absorbeur et le désorbeur est présent pour préchauffer la solution froide provenant de l'absorbeur et refroidir la solution en sortie du générateur [1].

Le cycle de la machine à absorption repose sur le principe selon lequel la température d'ébullition d'un mélange est supérieure à celle d'un liquide pur.

Le cycle à absorption est associé aux cycles trithermes (Figure.I.22) avec une utilisation réduite de l'énergie mécanique par rapport aux apports thermiques [34].

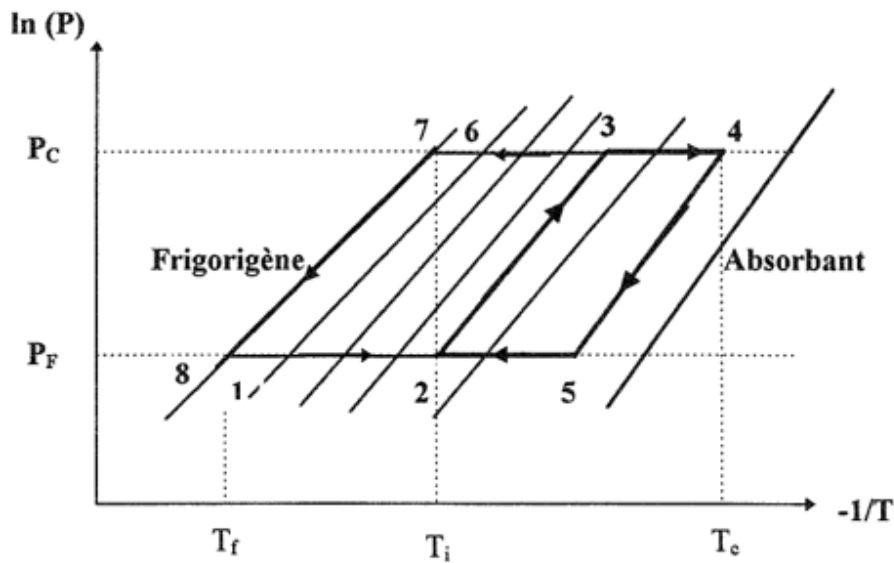


Figure I-22: Cycle de fonctionnement dans le diagramme de Oldham ( $\ln P, -1/T$ )

### I.10.1 Processus d'absorption :

L'absorption est définie comme un processus dans lequel deux fluides entrant à des états différents, tels que gaz ou liquide, sont combinés pour sortir à un seul état, soit gaz soit liquide comme illustré dans la (Figure.I.23) Un système de refroidissement fonctionnant sur le principe de l'absorption est appelé système de réfrigération par absorption. Il est important de différencier entre les systèmes de climatisation et les systèmes de réfrigération. Les systèmes de climatisation sont utilisés pour fournir du refroidissement au-dessus de  $0^\circ\text{C}$ , tandis que les systèmes de réfrigération sont utilisés pour fournir du refroidissement à la fois en dessous et au-dessus de  $0^\circ\text{C}$ . Un exemple courant de système de climatisation est une unité de refroidissement dans une maison, et un exemple de système de réfrigération est une unité de stockage alimentaire. Le système de réfrigération par absorption a été introduit pour la première fois en 1846 avec le concept de production de glace tout en utilisant la chaleur comme source d'énergie [1]



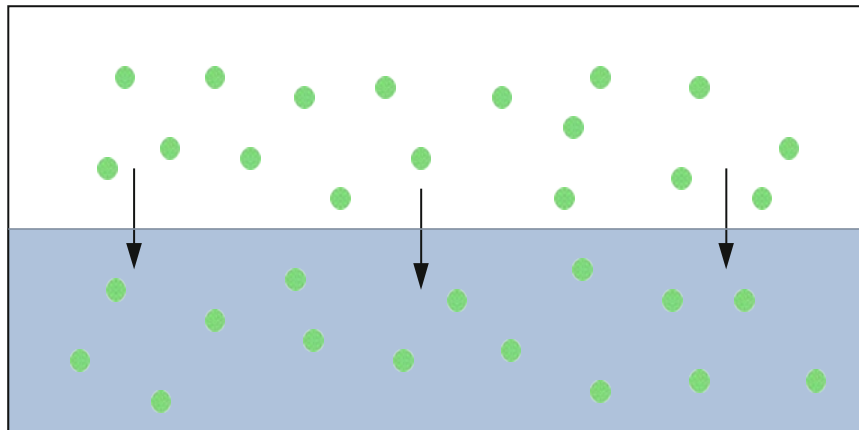


Figure I-23: Schematic illustration of an absorption process [1]

### I.11. Choix du couple :

L'efficacité d'une machine à absorption repose essentiellement sur les caractéristiques chimiques et thermodynamiques des fluides employés. Marcriss et al [35] ont classé plus de 200 absorbants avec plus de 40 composés de réfrigérant. Le Tableau I.2 donne quelques exemples des couples :

Tableau I-2: Couple utilisés pour le système à absorption [36]

<b>Frigorigènes</b>	<b>Absorbant</b>
➤ Eau (H <sub>2</sub> O)	➤ LiBr (Bromure de Lithium)
➤ Méthanol (CH <sub>3</sub> OH)	➤ LiBr
➤ Méthylamine (CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> )	➤ Eau (H <sub>2</sub> O)
➤ Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	➤ Eau (H <sub>2</sub> O)

Les couples les plus familiers et les mieux étudiés sont H<sub>2</sub>O-LiBr, souvent cité en exemple courant, et NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, considéré comme le plus ancien.



### **I.11.1 Avantages et inconvénients :**

#### **I.11.1.1 Le mélange (ammoniac-eau) : l'ammoniac est le fluide réfrigérant**

##### **A. Avantage :**

- Le coût réduit.
- Chaleur latente plus basse que celle de l'eau.
- Il convient même aux températures inférieures à 0 °C, offrant ainsi une large gamme d'utilisation.

##### **B. Inconvénients :**

- L'ammoniac est toxique, ce qui limite son utilisation réglementaire à des cas particuliers.
- La vapeur d'ammoniac sortant du bouilleur contient quelques traces de vapeur d'eau et circule dans le circuit frigorifique.

#### **I.11.1.2 Le mélange (eau - bromure de lithium) : l'eau est le fluide réfrigérant**

##### **A. Avantages :**

- L'eau non toxique.
- La chaleur latente massique de l'ammoniac est supérieure à celle des autres fluides réfrigérants, ce qui constitue un avantage dans les grandes installations en limitant les débits nécessaires et en réduisant ainsi les dimensions et, par conséquent, le coût.
- L'eau est un fluide inflammable.
- Faible viscosité.
- Moins couteux.

##### **B. Inconvénients :**

- Bromure de lithium (BrLi) est couteux.
- L'installation (H<sub>2</sub>O-BrLi) fonctionne sous vide, à une pression nettement inférieure à la pression atmosphérique.

Tableau I-3: Propriétés du fluide de travail d'absorption

Propriété	Ammoniac/Eau	Eau/Bromure de lithium
<b>Réfrigérant</b>		
Chaleur la tante élevée	Bien	Excellent
Pression de vapeur modérée	Trop haut	Trop bas
Basse température de congélation	Excellent	Application limitée
Faible viscosité	Bien	Bien
<b>Absorbant</b>		
Faible pression de vapeur	Pauvre	Excellent
Faible viscosité	Bien	Bien
<b>Mélange</b>		
Pas de phase solide	Excellent	Application limitée
Faible toxicité	Pauvre	Bien
<b>Haute affinité entre</b>	<b>Bien</b>	<b>Bien</b>
<b>Réfrigérant et absorbant</b>		

## I.12. Définitions et principes fondamentaux :

L'énergétique et l'exergie sont deux concepts fondamentaux en thermodynamique qui permettent de quantifier et d'analyser les flux et les transformations d'énergie dans les systèmes physiques.

### I.12.1 Énergie :

Une quantité qui décrit la capacité de créer un changement utile ou souhaitable ; ne peut être ni créée ni détruite mais peut changer de forme [37].

### I.12.2 L'exergie :

Est la mesure du travail maximal qu'un système peut effectuer lorsqu'il est ramené à l'équilibre avec un environnement de référence.

#### a) L'exergie du travail :

Dans un état stationnaire dynamique est égale au taux de transfert de travail ou de puissance transférée [38].

**b) L'exergie de la chaleur :**

Est une grandeur de transfert employée pour étudier les processus de transfert de chaleur irréversibles et les changements du contenu thermique de la matière [38].

**c) L'exergie physique :**

Est déterminée comme la quantité maximale de travail récupérable lorsque le flux  $j$  de substance est amené de son état initial à l'état environnemental défini par sa pression  $p_0$  et sa température  $t_0$  via des processus physiques réversibles [39].

**d) L'exergie chimique :**

Est équivalente à la quantité maximale de travail récupérable lorsque la substance est amenée de l'état environnemental défini par les paramètres  $t_0$  et  $p_0$  (état final de l'exergie physique à l'état mort - état de référence) via des processus impliquant uniquement un échange de substances avec l'environnement [39].

**I.13. Etude exergoéconomique :**

Une étude exergoéconomique de la réfrigération à absorption serait une analyse approfondie des performances et des coûts de ce système de réfrigération en utilisant des principes exégétiques et économiques (Figure.I.24).

- Le premier aspect est l'analyse exégétique basée sur l'établissement des bilans massiques, énergétiques, entropiques et exégétiques de chaque composant de la machine. Il vise le calcul du rendement exégétique de la machine
- Le second aspect est axé sur une analyse économique de la machine dans le but d'évaluer la faisabilité de l'investissement.

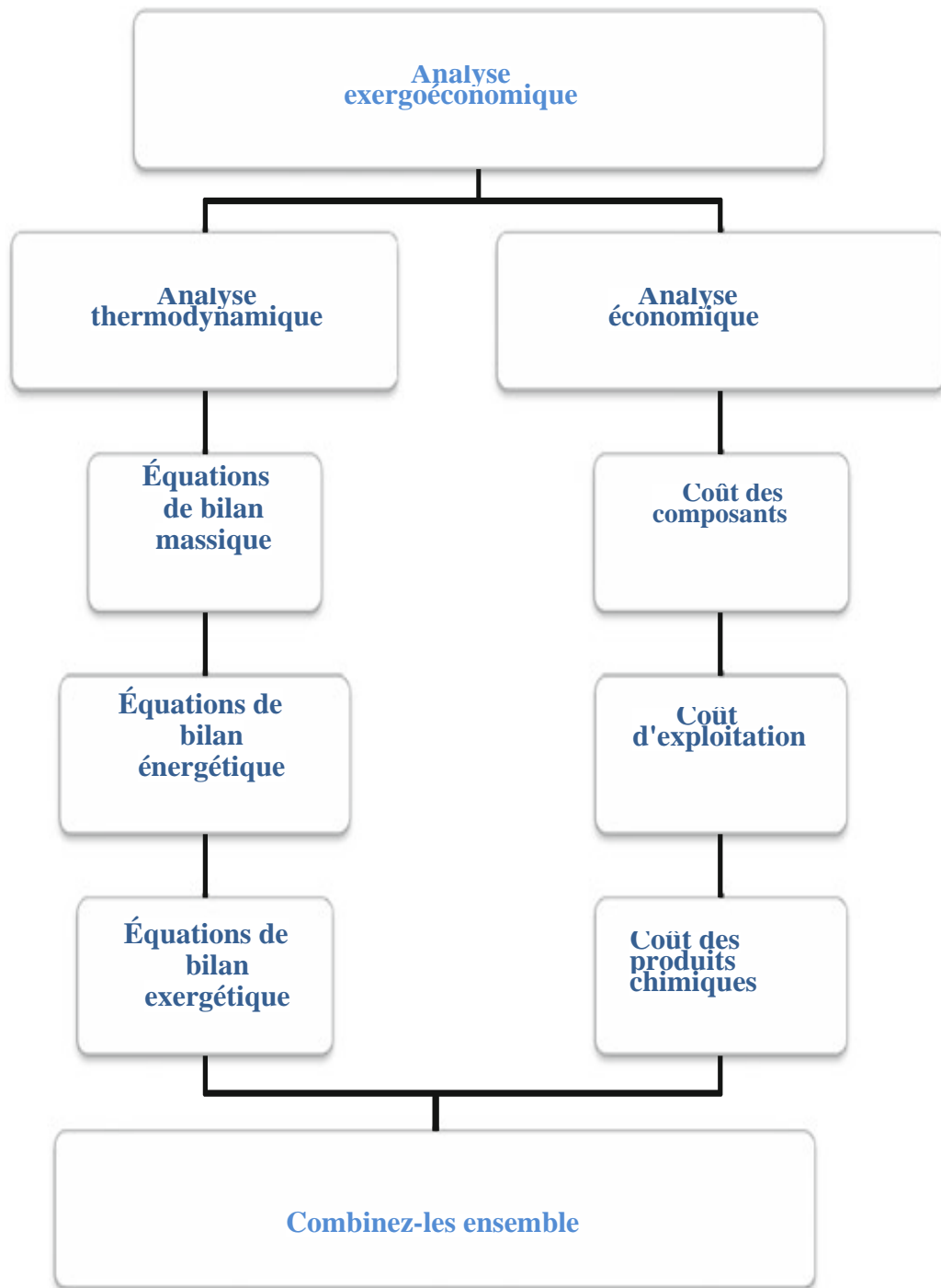


Figure I-24 : Plan d'étude exergoéconomique [1]

#### **I.14. Conclusion :**

L'approche exergoéconomique vise à évaluer l'efficacité énergétique d'un processus tout en prenant en compte les coûts associés à chaque composant et à son fonctionnement. Dans ce chapitre, nous en concluons que les technologies de réfrigération solaire offrent la possibilité de générer une variété étendue de températures froides. Les systèmes étudiés présentent un intérêt notable pour répondre aux besoins de réfrigération. En particulier, la technologie d'absorption peut répondre à la demande croissante d'efficacité énergétique et de la protection de l'environnement. Cela renforce notre décision de contribuer à la recherche sur les machines frigorifiques basées sur la technologie d'absorption.

## **Chapitre II**

Etude descriptive d'un système réfrigération par absorption

## **Chapire II :**

### **II.1. Introduction :**

Effectuer une analyse énergétique d'un système est la première étape pour déterminer la performance globale du système, car elle repose sur la loi fondamentale de conservation.

L'analyse énergétique est importante, mais pas suffisante car elle ne tient pas compte de l'irréversibilité, de l'inefficacité et de la destruction d'exergie. Il est nécessaire de faire un pas de plus pour se concentrer sur l'analyse exégétique qui peut être ensuite améliorée pour la comptabilité des coûts et l'évaluation de l'impact environnemental dans le cadre des analyses exergoéconomiques et exergoenvironnementales.

Ce chapitre présente Caractéristiques techniques et Précisions sur les composants et la méthodologie d'analyse énergétique et exergoéconomique de système de réfrigération à absorption simple effet.

### **II.2. Description du système étudié :**

Un système de réfrigération à absorption comprend généralement huit sous-systèmes de base qui sont :

- Le générateur
- L'absorbeur
- Le condenseur
- L'évaporateur
- La pompe
- Une vanne d'expansion (**pour la solution faible**)
- Une vanne d'expansion (**pour le réfrigérant**)
- Echangeur de chaleur

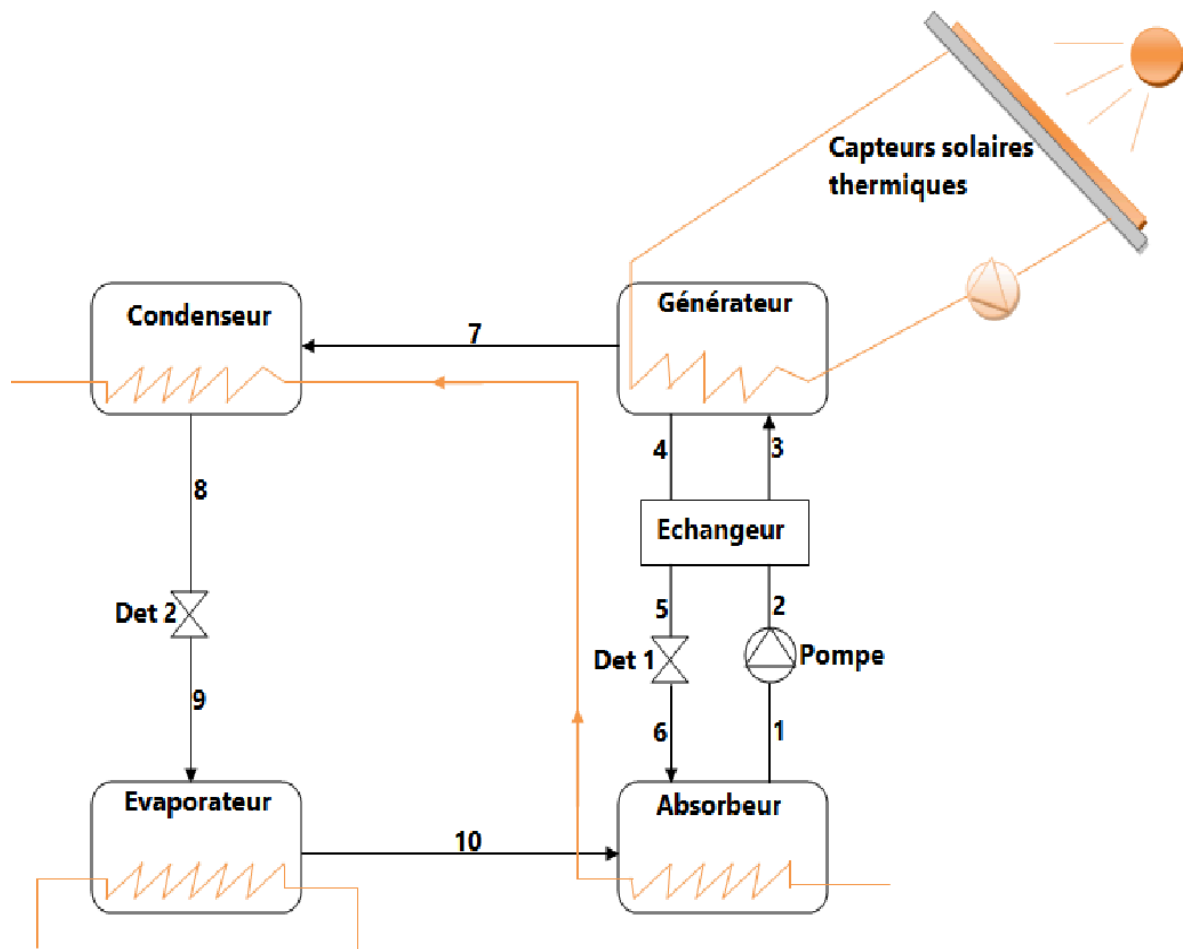


Figure II-1: le système de réfrigération à absorption simple effet

Comme illustré dans (*Figure II.1*) la Chacun de ces sous-systèmes a une tâche spécifique à accomplir afin de faire fonctionner avec succès le système de réfrigération à absorption.

### II.3. Analyse énergétique et exégétique de système réfrigération par absorption simple effet :

Dans cette partie, on examine comment l'énergie et l'exergie équations sont utilisées dans chaque élément du SEARS :



### II.3.1 Pompe :

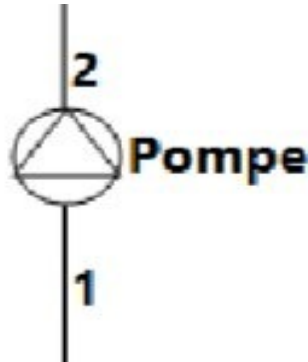


Figure II-2: Schéma de la pompe

#### Équation de bilan de masse :

On établit une équation de bilan de masse pour la pompe, comme suit :

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m}_p \quad (II.1)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_p \quad (II.2)$$

où  $\dot{m}$  représente le débit massique, c'est la quantité de fluide qui passe à travers la pompe.

#### Équation de puissance spécifique consommée par la pompe :

$$w_p = \frac{v(P_2 - P_1)}{\eta_p} \quad (II.3)$$

Où  $w$ ,  $v$ ,  $P$  et  $\eta$  représentent respectivement la puissance spécifique, le volume spécifique, la pression et le rendement.

#### Équation de puissance totale consommée par la pompe :

$$\dot{W}_p = \dot{m}_p w_p \quad (II.4)$$

Où  $\dot{W}_p$  représente la puissance totale consommée par la pompe.

**L'équation de bilan énergétique global de la pompe :**

$$\sum(\dot{m}h)_{in} + \sum \dot{W}_p = \sum(\dot{m}h)_{out} \quad (II.5)$$

$$(\dot{m}h)_1 + \dot{W}_p = (\dot{m}h)_2 \quad (II.6)$$

Où h représente l'enthalpie spécifique de l'état.

**L'équation des exergies spécifiques aux états 1 et 2 :**

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (II.7)$$

$$ex_1 = (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad (II.8)$$

$$ex_2 = (h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0) \quad (II.9)$$

Où ex, T et s représentent respectivement l'exergie spécifique, la température et l'entropie spécifique.

**L'équation de bilan exégétique global de la pompe :**

$$\sum(\dot{m} \times ex)_{in} + \dot{W}_{pompe} = \sum(\dot{m} \times ex)_{out} + \dot{E}x_{dest,p} \quad (II.10)$$

$$\dot{m}_1 ex_1 + \dot{W}_p = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{E}x_{dest,p} \quad (II.11)$$

où  $\dot{E}x_{dest,p}$  représente le taux de destruction d'exergie dans la pompe.

### II.3.2 Échangeur de chaleur à récupération de chaleur :

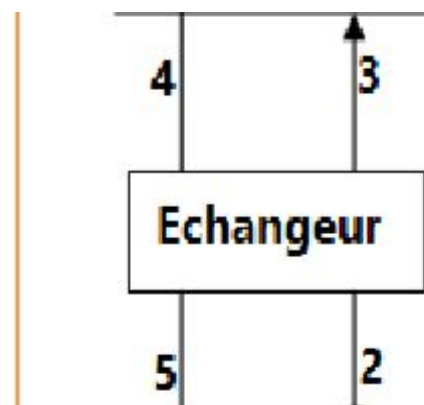


Figure II-3: schéma de Echangeur

Les équations de bilan de masse pour l'échangeur de chaleur à récupération de chaleur :

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (\text{II.12})$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (\text{II.13})$$

L'équation de bilan énergétique :

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 \quad (\text{II.14})$$

L'équation des exergies spécifiques aux états 3 à 5 :

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (\text{II.15})$$

$$ex_3 = (h_3 - h_0) - T_0(s_3 - s_0) \quad (\text{II.16})$$

$$ex_4 = (h_4 - h_0) - T_0(s_4 - s_0) \quad (\text{II.17})$$

$$ex_5 = (h_5 - h_0) - T_0(s_5 - s_0) \quad (\text{II.18})$$

L'équation de bilan d'exergie :

$$\dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_4 ex_4 = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_5 ex_5 + \dot{E}x_{dest,HX} \quad (\text{II.19})$$

Où  $\dot{E}x_{dest,HX}$  représente le taux de destruction d'exergie dans l'échangeur de chaleur à récupération de chaleur.

### II.3.3 Générateur :

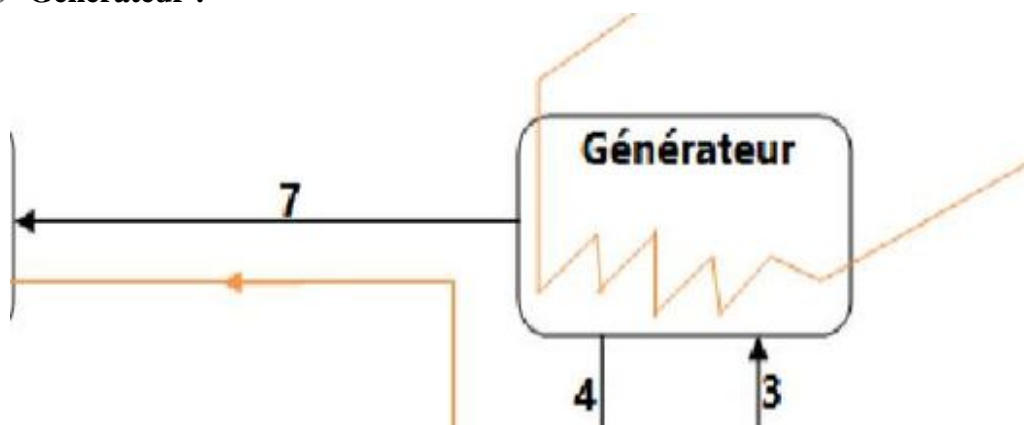


Figure II-4: schéma de générateur

**Les équations de bilan de masse du générateur :**

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (II.20)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7 \quad (II.21)$$

Et

$$\sum (\dot{m}x)_{in} = \sum (\dot{m}x)_{out} \quad (II.22)$$

$$\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_4 x_4 + \dot{m}_7 x_7 \quad (II.23)$$

Où x représente la concentration de la solution.

**L'équation de bilan énergétique :**

$$\sum (\dot{m}h)_{in} + \sum \dot{Q}_g = \sum (\dot{m}h)_{out} \quad (II.24)$$

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}_g = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 \quad (II.25)$$

Où  $\dot{Q}_g$  représente le taux de chaleur requis par le générateur.

**L'équation des exergies spécifiques aux états 6 et 7 :**

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (II.26)$$

$$ex_6 = (h_6 - h_0) - T_0(s_6 - s_0) \quad (II.27)$$

$$ex_7 = (h_7 - h_0) - T_0(s_7 - s_0) \quad (II.28)$$

**L'équation du taux d'exergie thermique fourni au générateur :**

$$\dot{E}x_{th,g} = \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) \dot{Q}_g \quad (II.29)$$

Où  $\dot{E}x_{th,g}$  représente le taux d'exergie thermique du générateur.

**L'équation de bilan d'exergie :**

$$\sum(\dot{m} \times ex)_{in} + \dot{E}x_{th,g} = \sum(\dot{m} \times ex)_{out} + \dot{E}x_{dest,g} \quad (II.30)$$

$$\dot{m}_3 ex_3 + \dot{E}x_{th,g} = \dot{m}_4 ex_4 + \dot{m}_7 ex_7 + \dot{E}x_{dest,g} \quad (II.31)$$

Où  $\dot{E}x_{dest,g}$  représente le taux de destruction d'exergie dans le générateur.

### II.3.4 Condenseur :

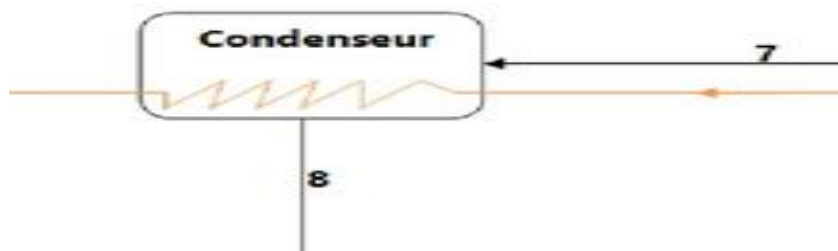


Figure II-5 : Schéma de condenseur

**L'équation de bilan de masse pour le condenseur :**

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (II.32)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (II.33)$$

**L'équation de bilan énergétique :**

$$\sum(\dot{m}h)_{in} = \sum(\dot{m}h)_{out} + \sum \dot{Q}_c \quad (II.34)$$

$$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{Q}_c \quad (II.35)$$

Où  $\dot{Q}_c$  représente le taux de chaleur rejetée par le réfrigérant traversant le condenseur.

**L'exergie spécifique à l'état 8 :**

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (II.36)$$

$$ex_8 = (h_8 - h_0) - T_0(s_8 - s_0) \quad (II.37)$$

**Le taux d'exergie thermique libéré par le condenseur :**

$$\dot{E}x_{th,c} = \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right) \dot{Q}_c \quad (II.38)$$

Où  $\dot{E}x_{th,c}$  représente le taux d'exergie thermique.

**L'équation de bilan d'exergie :**

$$\sum(\dot{m} \times ex)_{in} = \sum(\dot{m} \times ex)_{out} + \dot{E}x_{th,c} + \dot{E}x_{dest,c} \quad (II.39)$$

$$\dot{m}_7 ex_7 = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{th,c} + \dot{E}x_{dest,c} \quad (II.40)$$

Où  $\dot{E}x_{dest,c}$  représente le taux de destruction d'exergie dans le condenseur.

**II.3.5 Évaporateur :**

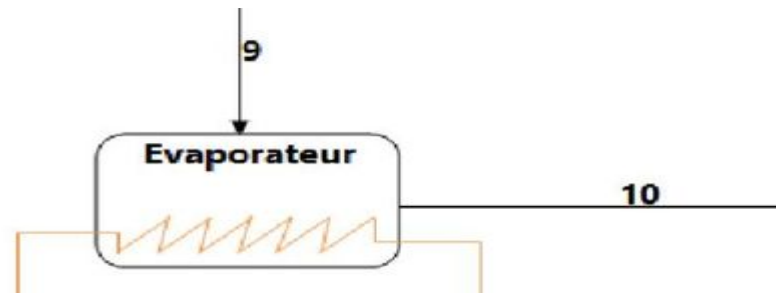


Figure II-6: schéma de Evaporateur

**L'équation de bilan de masse pour l'évaporateur :**

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (II.41)$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (II.42)$$

**L'équation de bilan d'énergie :**

$$\sum(\dot{m}h)_{in} + \sum \dot{Q}_e = \sum(\dot{m}h)_{out} \quad (II.43)$$

$$\dot{m}_9 h_9 + \dot{Q}_e = \dot{m}_{10} h_{10} \quad (II.44)$$

Où  $\dot{Q}_e$  représente le taux de chaleur gagnée par le réfrigérant circulant à travers l'évaporateur.

**L'exergie spécifique aux états 9 et 10 :**

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (II.45)$$

$$ex_9 = (h_9 - h_0) - T_0(s_9 - s_0) \quad (II.46)$$

$$ex_{10} = (h_{10} - h_0) - T_0(s_{10} - s_0) \quad (II.47)$$

**Le taux d'exergie thermique fourni à l'évaporateur :**

$$\dot{E}x_{th,e} = \left(1 - \frac{T_0}{T_C}\right) \dot{Q}_e \quad (II.48)$$

Où  $\dot{E}x_{th,e}$  représente le taux d'exergie thermique de l'évaporateur.

**L'équation de bilan d'exergie :**

$$\sum(\dot{m} \times ex)_{in} + \dot{E}x_{th,e} = \sum(\dot{m} \times ex)_{out} + \dot{E}x_{dest,e} \quad (II.49)$$

$$\dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{th,e} = \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{E}x_{dest,e} \quad (II.50)$$

Où  $\dot{E}x_{dest,e}$  représente le taux de destruction d'exergie dans l'évaporateur

### II.3.6 Absorbeur :

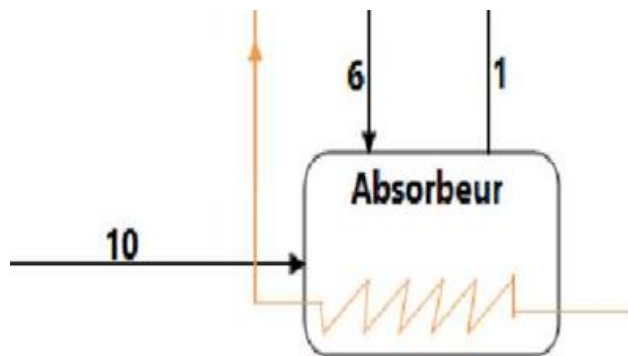


Figure II-7: schéma de l'absorbeur

**L'équation de bilan de masse pour l'absorbeur :**

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (II.51)$$

$$\dot{m}_{10} + \dot{m}_6 = \dot{m}_1 \quad (II.52)$$

**L'équation de bilan d'énergie :**

$$\Sigma(\dot{m}h)_{in} = \Sigma(\dot{m}h)_{out} + \Sigma \dot{Q}_a \quad (II.53)$$

$$\dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_6h_6 = \dot{m}_1h_1 + \dot{Q}_a \quad (II.54)$$

Où  $\dot{Q}_a$  représente le taux de chaleur rejetée par l'absorbeur.

**Le taux d'exergie thermique libéré par l'absorbeur :**

$$\dot{E}x_{th,a} = \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right)\dot{Q}_a \quad (II.55)$$

Où  $\dot{E}x_{th,a}$  représente le taux d'exergie thermique de l'absorbeur.

**L'équation de bilan d'exergie :**

$$\Sigma(\dot{m} \times ex)_{in} = \Sigma(\dot{m} \times ex)_{out} + \dot{E}x_{th,a} + \dot{E}x_{dest,a} \quad (II.56)$$

$$\dot{m}_{10}ex_{10} + \dot{m}_6ex_6 = \dot{m}_1ex_1 + \dot{E}x_{th,a} + \dot{E}x_{dest,a} \quad (II.57)$$

Où  $\dot{E}x_{dest,a}$  représente le taux de destruction d'exergie dans l'absorbeur.

**II.3.7 Valve d'expansion (pour la solution faible) :**

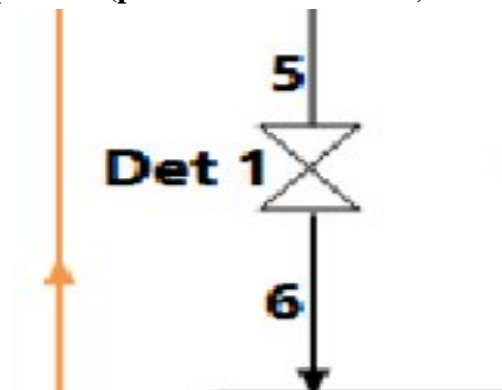


Figure II-8: schéma Valve d'expansion (pour la solution faible)

**L'équation de bilan de masse pour la valve d'expansion de la solution faible :**

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (II.58)$$



**L'équation de bilan d'énergie :**

$$\dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_6 h_6 \quad (II.59)$$

**L'équation de bilan d'exergie de la valve d'expansion de la solution faible :**

$$\dot{m}_5 ex_5 = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{E}x_{dest,evw} \quad (II.60)$$

Où  $\dot{E}x_{dest,evw}$  représente le taux de destruction d'exergie dans la valve d'expansion de la solution faible.

### II.3.8 Valve d'expansion (pour le réfrigérant) :

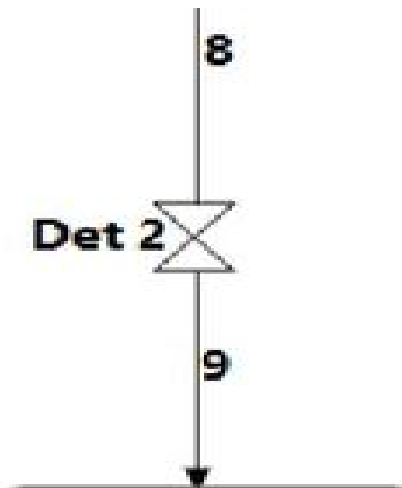


Figure II-9 : schéma de Valve d'expansion (pour le réfrigérant)

**L'équation de bilan de masse pour la valve d'expansion du réfrigérant :**

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \quad (II.61)$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (II.62)$$

**L'équation de bilan d'énergie :**

$$\sum(\dot{m}h)_{in} = \sum(\dot{m}h)_{out} \quad (II.63)$$

$$\dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_9 h_9 \quad (II.64)$$

**L'équation de bilan d'exergie :**

$$\sum(\dot{m} \times ex)_{in} = \sum(\dot{m} \times ex)_{out} + \dot{E}x_{dest,evr} \quad (II.65)$$

$$\dot{m}_8 ex_8 = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{dest,evr} \quad (II.66)$$

Où  $\dot{E}x_{dest,evr}$  représente le taux de destruction d'exergie dans la valve d'expansion du réfrigérant.

### II.3.9 Les coefficients de performance énergétique et exégétique :

La performance d'un système de réfrigération par absorption est mesurée en utilisant le coefficient de performance. Les coefficients de performance énergétique et exégétique des systèmes de réfrigération par absorption sont définis comme

$$COP_{en} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + \dot{W}_p}$$

$$COP_{ex} = \frac{\dot{E}x_{th,e}}{\dot{E}x_{th,g} + \dot{W}_p}$$

Où  $COP_{en}$  et  $COP_{ex}$  représentent respectivement le COP énergétique et le COP exergétique.

### II.4. Analyse Exergoéconomique :

Cette section présente les équations d'analyse exergoéconomique du système de réfrigération par absorption à effet simple.

**L'équation exergoéconomique globale :**

$$\dot{Z}_{eq} + \dot{C}_{OPM} = \dot{C}_{Cool} \quad (II.69)$$

Où  $\dot{Z}_{eq}$ ,  $\dot{C}_{OPM}$  et  $\dot{C}_{Cool}$  représentent respectivement. Le coût associé aux équipements, à l'exploitation et à la maintenance, et au refroidissement.

**Le coût lié à l'équipement :**

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{C}_a + \dot{C}_g + \dot{C}_c + \dot{C}_e + \dot{C}_p + \dot{C}_{ev} \quad (II.70)$$

Où  $\dot{C}_a$ ,  $\dot{C}_g$ ,  $\dot{C}_c$ ,  $\dot{C}_e$ ,  $\dot{C}_p$  et  $\dot{C}_{ev}$  représentent respectivement le coût de l'absorbeur, du générateur, du condenseur, de l'évaporateur, de la pompe et de la valve d'expansion.

Cependant, le coût total de l'équipement peut également être calculé en utilisant une relation entre le coût de l'équipement et la charge de refroidissement comme fourni ci-dessous.

$$\dot{Z}_{eq}(\$) = 1144.3(\dot{Q}_{cool})^{0.67} \quad (II.71)$$

**Le coût associé à l'exploitation et à la maintenance :**

$$\dot{C}_{OPM} = c_{OPM} * \dot{E}x_{OPM} \quad (II.72)$$

Où  $c_{OPM}$  et  $\dot{E}x_{OPM}$  représentent respectivement le coût d'exploitation et de maintenance, et l'exergie transportée par l'énergie consommée en termes de chaleur et de puissance.

L'exploitation et la maintenance peuvent également être supposées représenter 3 % du coût total de l'équipement.

**Le coût lié au refroidissement produit :**

$$\dot{C}_{cool} = c_{cool} * \dot{E}x_{cool} \quad (II.73)$$

Où  $c_{cool}$  et  $\dot{E}x_{cool}$  représentent respectivement le coût du refroidissement produit et l'exergie associée au refroidissement produit.

Ainsi, l'équation ci-dessus peut être écrite comme

$$(c * \dot{E}x)_{OPM} + \dot{Z}_{eq} = (c * \dot{E}x)_{cool} \quad (II.74)$$

Le coût du refroidissement peut ensuite être calculé en réarrangeant l'équation mentionnée ci-dessus et en la réécrivant comme suit

$$c_{cool} = \frac{(c * \dot{E}x)_{OPM} + \dot{Z}_{eq}}{\dot{E}x_{cool}}$$

## II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu les composant du système de réfrigération à absorption, nous avons expliqué l'analyse énergétique et exégétique et exergoéconomique de chaque composant.

## **Chapitre III**

Etude exergetique et exergoéconomique de système de réfrigération par absorption simple effet entraine par une source solaire

### Chapire III :

#### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons faire une analyse exergetique et exergoéconomique d'une machine de réfrigération simple effet entraine par une source solaire en utilisant le couple (H<sub>2</sub>O/LiBr) comme fluide de fonctionnement.

#### III.2. Description du logiciel EES :

Les calculs d'analyse énergétique et exergoéconomique de système de réfrigération par absorption simple effet., ainsi que les études paramétriques, ont été réalisés à l'aide du logiciel « EES ». EES, qui se prononce « EASE » et signifie littéralement « facilité », est l'acronyme de Engineering Equation Solver, ou Solveur d'équations pour l'ingénierie. Ce logiciel est un programme générale résolution d'équations, capable de résoudre des centaines d'équations algébriques et différentielles non linéaires. EES intègre des fonctions pour les propriétés thermodynamiques et de transport de nombreuses substances, et permet également l'ajout facile de fonctions définies par l'utilisateur (User Defined Functions, UDF). L'utilisateur peut insérer des fonctions selon plusieurs méthodes.

#### III.3. Conditions de fonctionnement pour le cycle simple effet :

*Tableau III-1 : conditions de fonctionnement pour le cycle réfrigération par absorption simple effet .*

Nom de l'entrée	valeur	Nom de l'entrée	valeur
$Eff_{hx}$	0.6	T[13]	23 C°
$m_1$	0.1 kg/s	$m_{13}$	0.3 kg/s
UAa	1.9 kW/K	T[15]	23 C°
UAc	1.4 kW/K	$m_{15}$	0.28 kg/s
UAd	1.2 kW/K	T[11]	90 C°
UAe	2.6 kW/K	$m_{11}$	0.8 kg/s
Q[8]	0	T[17]	11 C°
Q[10]	1	$m_{17}$	0.17 kg/s

### III.4. Etude paramétrique du cycle :

Le modèle simplifié du cycle à absorption à simple effet suppose l'existence de deux niveaux de pression dominants dans le système, en ignorant les pertes de pression dans les conduites de liaison. Cette simplification implique que le désorbeur et le condenseur, ainsi que l'évaporateur et l'absorbeur, fonctionnent sous des pressions équivalentes. La pression la plus élevée est déterminée par la pression du liquide saturé à la sortie du condenseur, tandis que la pression la plus basse est déterminée par la température du réfrigérant à la sortie de l'évaporateur.

Dans une machine à absorption à simple effet utilisant le couple H<sub>2</sub>O-LiBr, la pression élevée est généralement inférieure à 10 kPa en termes absolus, ce qui signifie que l'ensemble du système fonctionne en dessous de la pression atmosphérique. Cette caractéristique nécessite une conception étanche pour éviter les fuites d'air. Les basses pressions imposent également des contraintes sur la conception des composants, car les pertes de charge visqueuses doivent être minimisées.

*Tableau III-2: Résumé des états thermodynamiques pour la simulation*

Indiquer	état	Remarques
1	Solution liquide saturée.	Qualité de la vapeur réglée à 0 comme hypothèse.
2	Solution liquide sous refroidie.	Etat calculé à partir du modèle de pompe isentropique.
3	Solution liquide sous refroidie.	Etat calculé à partir du modèle d'échangeur de chaleur en solution.
4	Solution liquide saturée.	Qualité de la vapeur réglée à 0 comme hypothèse.
5	Solution liquide sous refroidie.	Etat calculé à partir du modèle d'échangeur de chaleur en solution.
6	Etat de la solution vapeur-liquide.	La vapeur clignote lorsque le liquide passe à travers le détendeur.
7	Vapeur d'eau surchauffée	Supposé avoir teneur nulle en sel.

8	Eau liquide saturée	Qualité de la vapeur réglée à 0 comme hypothèse.
9	Etat de l'eau vapeur- liquide	La vapeur clignote lorsque le liquide passe à travers le détendeur
10	Vapeur d'eau saturée.	Qualité de la vapeur fixée à 1 comme hypothèse.

La modélisation du système de réfrigération à absorption est réalisée par le logiciel EES (Engineering Equation Solver).

### III.5. Influence de l'apport de chaleur :

Dans le fonctionnement d'une machine à absorption, toute modification d'une variable d'entrée engendre des ajustements dans toutes les autres variables dépendantes. Chaque fois qu'une entrée est modifiée, l'ensemble du cycle réagit afin d'atteindre un nouvel état d'équilibre opérationnel.

La figure III-1 présente un exemple de la réponse du cycle à une modification des conditions de fonctionnement. En effet une variation de la température du fluide générateur au niveau du désorbeur entraîne des ajustements dans les pressions présentes dans la machine, ainsi que dans les coefficients de performance (COP en) et (COP ex). Cette interrelation offre des insights précieux sur la combinaison optimale des pressions de fonctionnement. On observe que le (COP en) prend sa valeur maximale (COP en max) = 0.6925 pour une plage de températures de 74.1 à 80.3 °C, et (COP ex) prend sa valeur maximale (COP ex max) = 0.394 pour la température 74 °C, correspondant à un intervalle de basse pression de 0.873 à 0.921 kPa et de haute pression de 4.61 à 5.12 kPa pour (COP en) et de basse pression de 0.921 kPa et de haute pression de 4.61 kPa pour (COP ex) ,



De plus, la figure montre que l'augmentation de la température de désorption accroît la différence de pression de travail, passant de 4.268 à 0.974 kPa à 70 °C à 8.571 à 0.643 kPa à 120 °C.

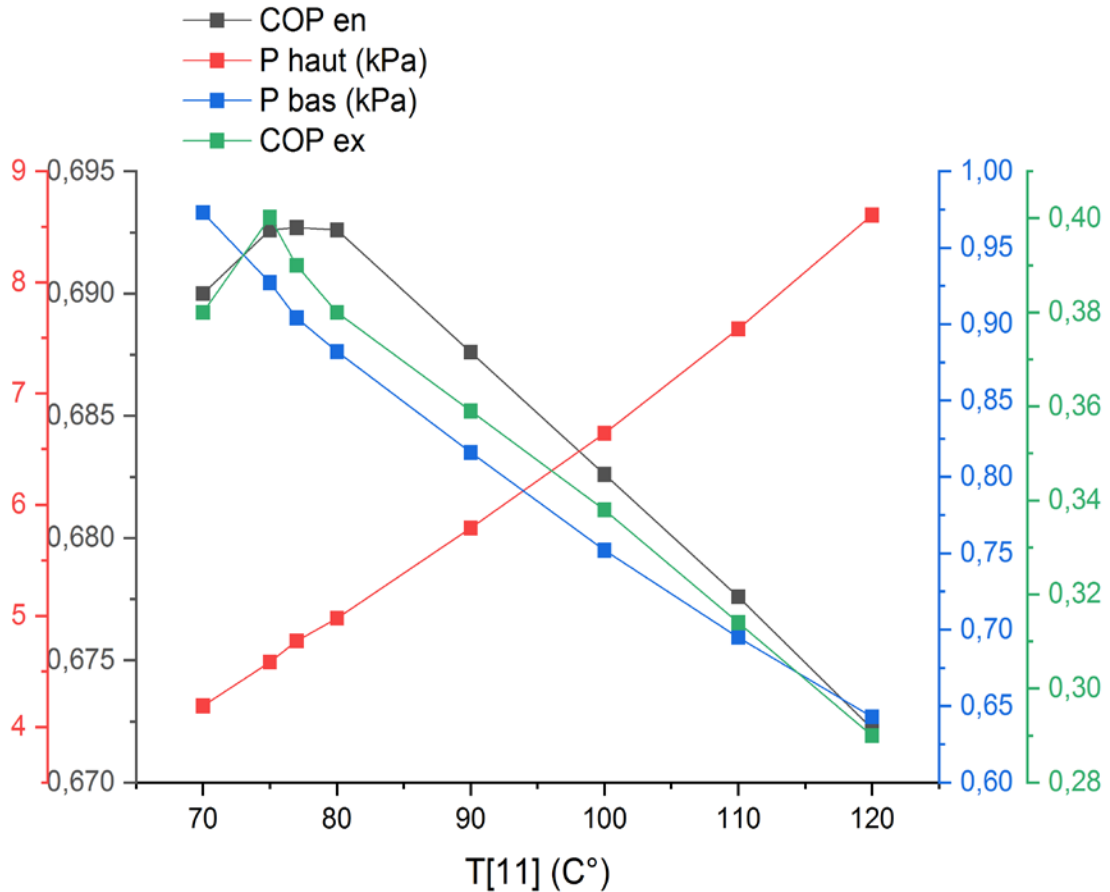


Figure III-1 : Influence de la température du fluide générateur sur les pressions de travail et le (COP en) et (COP ex)

La figure III-2 montre comment la température de désorption impacte les quantités de chaleur impliquées aux différents points de l'installation. Bien que l'augmentation de cette température accélère le processus de désorption, elle entraîne inévitablement une augmentation des besoins en chaleur au niveau de l'absorbeur et du condenseur. Cela nécessite l'utilisation de systèmes de rejet de chaleur plus grands et par conséquent plus encombrants.

La figure III-3 explore un différent aspect de l'impact de l'apport de chaleur, se concentrant sur le coefficient global de transfert de chaleur, un paramètre qui reflète la dimension du désorbeur. On observe que le (COP en) atteint son maximum de 0.6924 lorsque le coefficient global de transfert de chaleur se situe entre 0.256 et 0.341 kW/K, correspondant à une plage de capacité frigorifique de 10.61 à 11.942 kW, et le (COP ex) atteint son maximum de 0.3954 lorsque le coefficient global de transfert de chaleur se situe entre 0.1782 et 0.255 kW/K, correspondant à une plage de capacité frigorifique de 8.127 à 10.598 kW.

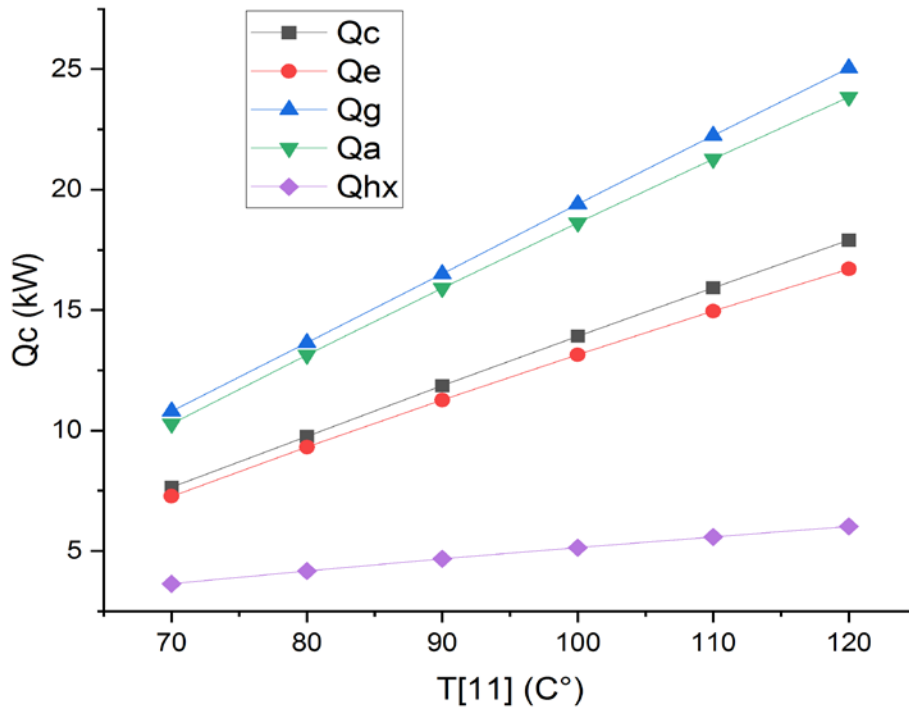


Figure III-2 : Influence de T[11] sur des quantités de chaleur mises en jeu

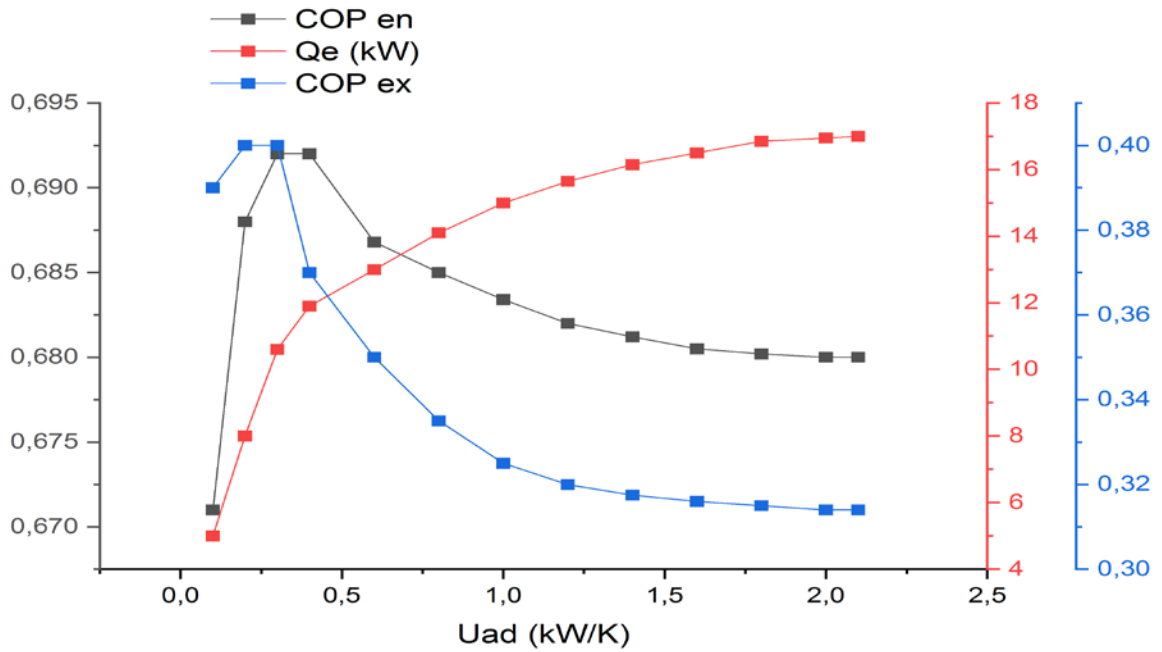


Figure III-3 : Influence de la taille du désorbeur (le coefficient global de transfert de chaleur du désorbeur) sur le (COP en) et (COP ex) et la capacité frigorifique (Qe)

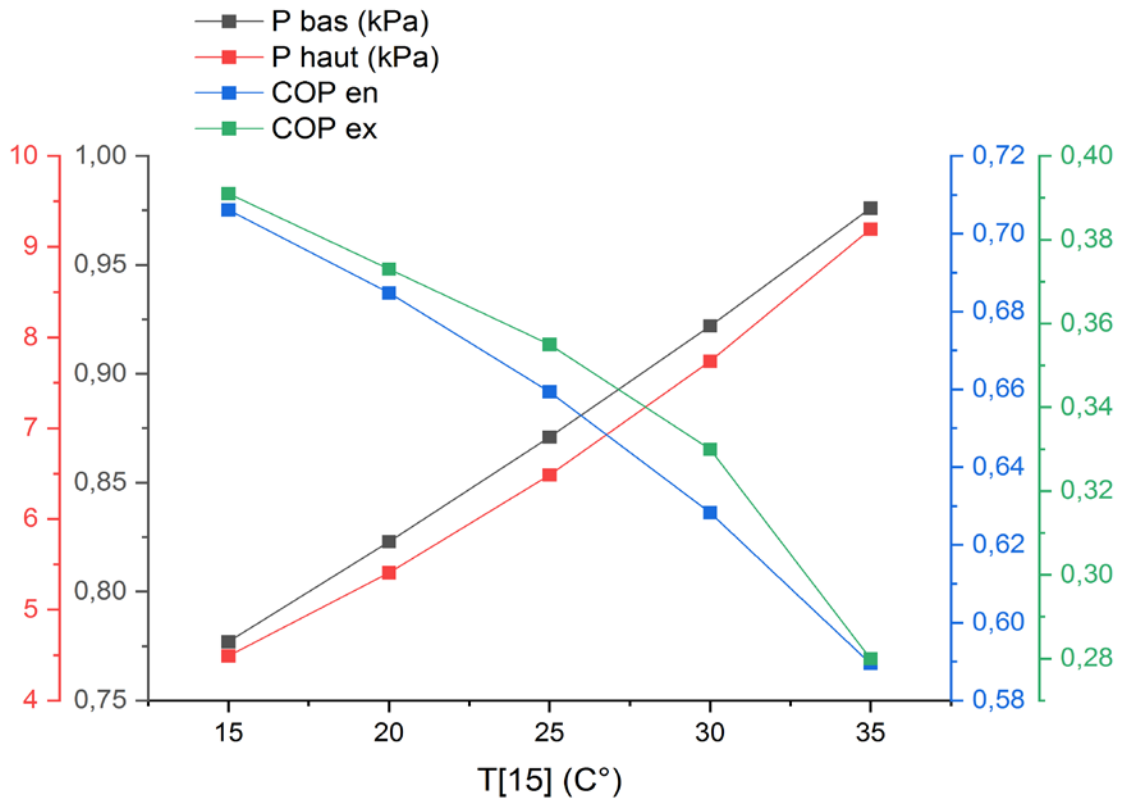


Figure III-4 : Influence de la température de rejet de chaleur sur le COP et les pressions de travail

### III.6. Influence du rejet de chaleur sur les performances du cycle :

La dissipation de chaleur se réalise au niveau de du condenseur et l'absorbeur. Le système de refroidissement transfère la chaleur excédentaire à une tour de refroidissement. Ce composant est chargé d'éliminer la chaleur excédentaire du système.

La figure III-4 montre comment la température de rejet de chaleur au niveau d'influence les pressions de travail et le (COP) en et (COP ex). Contrairement à l'effet de la température de désorption, une augmentation de la température de rejet de chaleur entraîne une évolution proportionnelle des pressions de travail. En ce qui concerne le COP en et COP ex, on observe respectivement une diminution de 0.704 à 0.5891 et 0.392 à 0.281, avec une valeur maximale à 15 °C pour les deux.

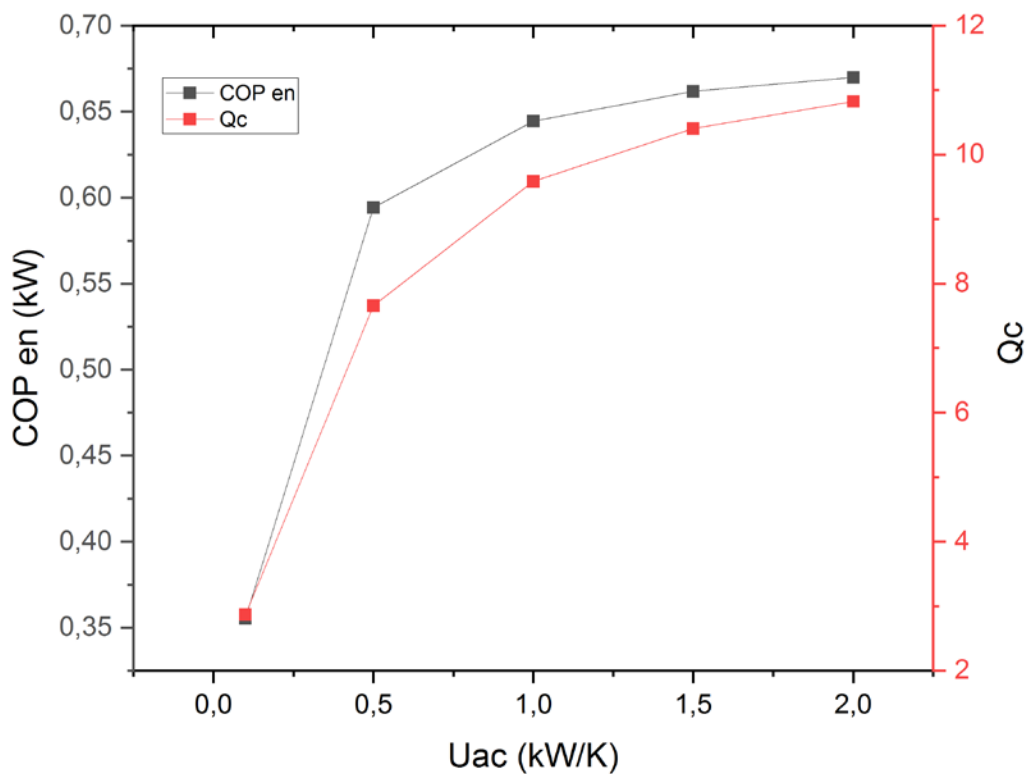


Figure III-5 : Influence du coefficient global de transfert de chaleur du condenseur sur le COP et la capacité calorifique.

Les figures III-5 et III-6 montrent comment la taille des deux composants de rejet de chaleur influence les coefficients globaux de transfert de chaleur. On observe que des coefficients plus élevés entraînent une augmentation du COP et de la capacité frigorifique. Ces échangeurs dissipent efficacement l'excès de chaleur, ce qui permet d'atteindre des performances relativement élevées. Cependant, ils augmentent le coût d'investissement en raison de leur grande taille (surface d'échange importante) ainsi que de la nécessité d'une tour de refroidissement de taille conséquente.

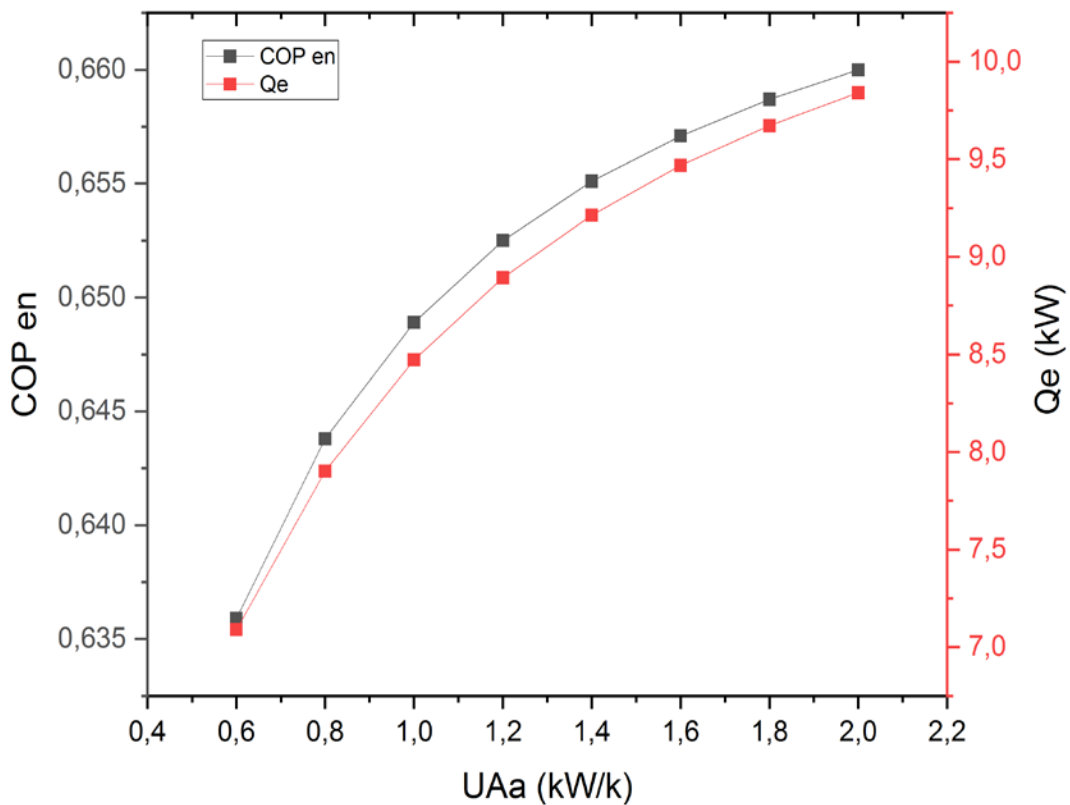


Figure III-6 : Influence du coefficient global de transfert de chaleur de l'absorbeur sur le COP et la capacité calorifique.

### III.7. Influence de la concentration de la solution forte sur les performances du cycle :

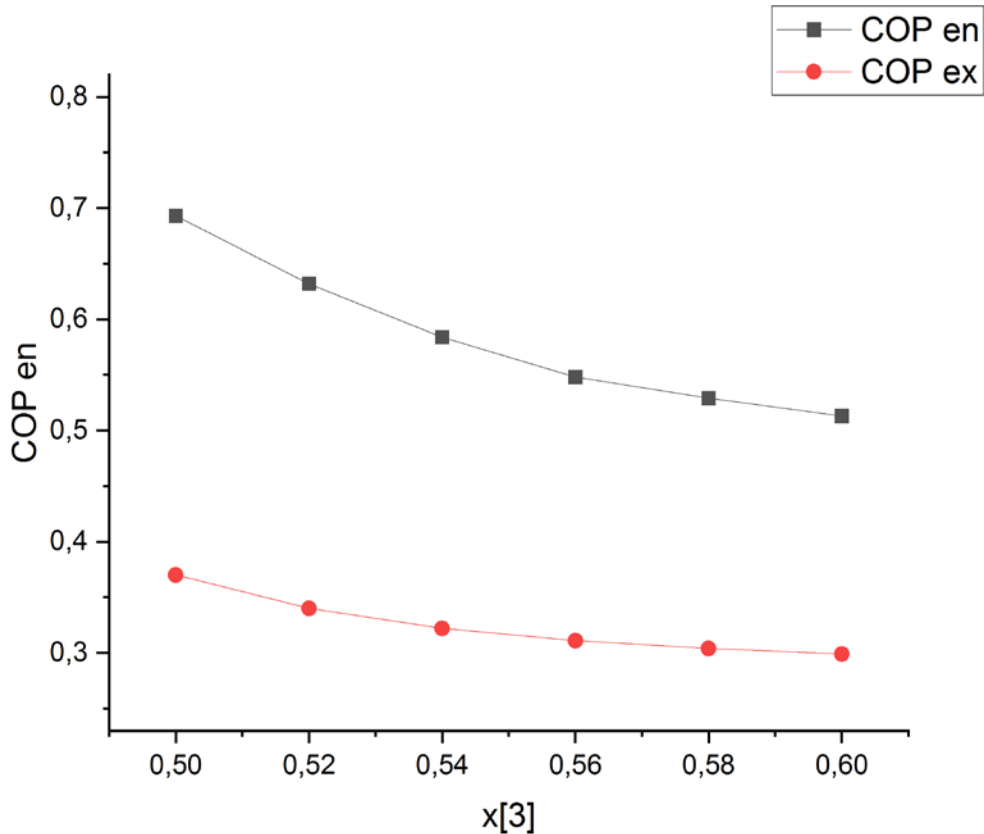


Figure III-7 : Effets de la concentration de la solution forte sur les (COP en) et (COP ex).

La figure III-7 montre les effets de la variation de la concentration de la solution forte sur le (COP en) et (COP ex). Les COP énergétiques et exergetiques diminuent respectivement de 0,695 à 0,521 et de 0,378 à 0,289 avec une augmentation de la concentration de la solution forte de 0,5 à 0,6. Cette tendance à la baisse des COP s'explique par le fait que les COP sont directement liés à la capacité de refroidissement. À mesure que la capacité de refroidissement du système diminue, les COP du système diminuent également.

### III.8. Influence de température d'évaporateur sur les performances du cycle :

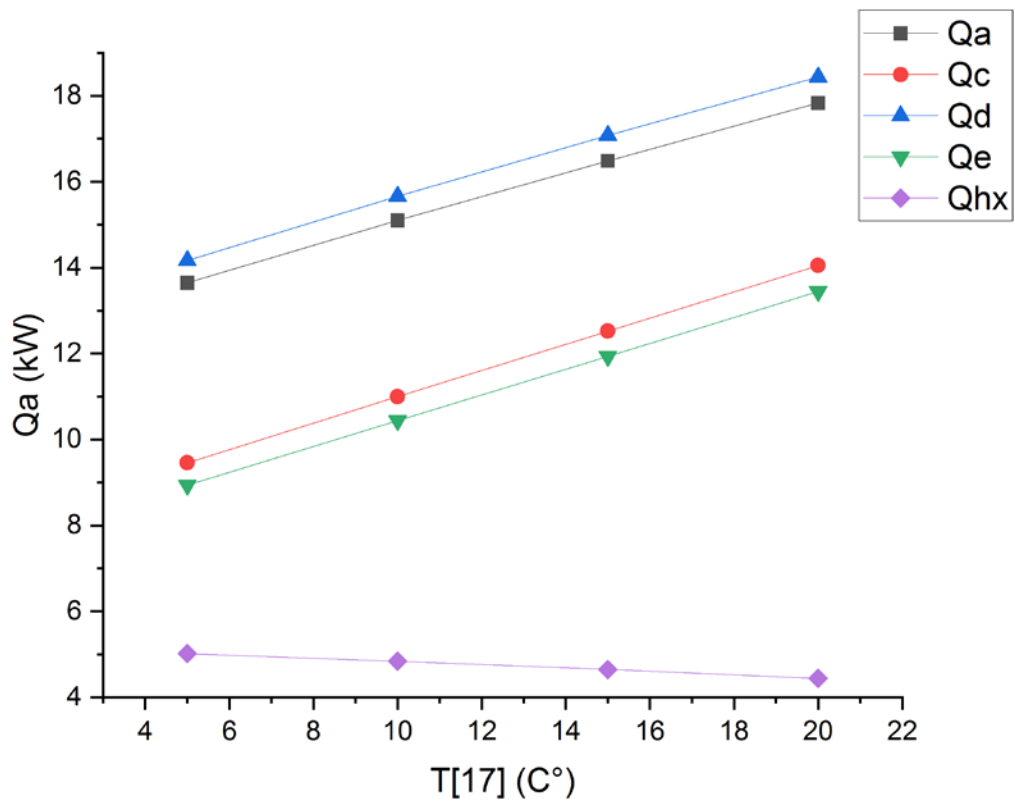


Figure III-8 : Influence de température d'évaporateur sur les différent chaleur

La figure III-8 montre comment la température d'évaporateur impacte les quantités de chaleur impliquées aux différents points de l'installation. L'augmentation de cette température entraîne inévitablement une augmentation des besoins en chaleur au niveau de l'absorbeur et du condenseur et diminution besoins en chaleur au l'échangeur de chaleur. Cela nécessite l'utilisation de systèmes de rejet de chaleur plus grands et par conséquent plus encombrants.

La figure III-9 montre comment une augmentation de la température de l'évaporateur de 5 à 20°C peut augmante le COP énergétique de 0.6307 à 0.7292 et diminution de (COP ex) de 0.3702 à 0.241. Cela est dû au fait que les COP dépend directement de la différence de température entre la source chaude et la source froide (l'évaporateur). Si la température de

L'évaporateur augmente, cette différence de température diminue, ce qui peut réduire l'efficacité du transfert de chaleur et de COP ex.

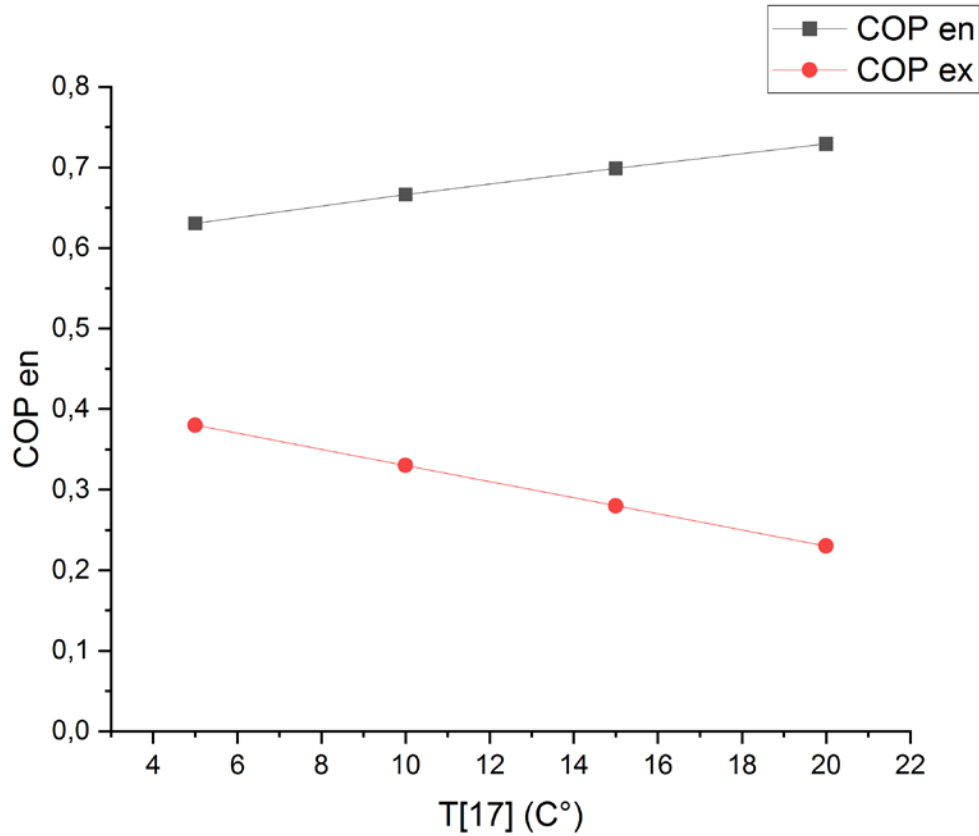


Figure III-9 : Influence de température d'évaporateur sur les COP

### III.9. Influence d'efficacité d'échangeur sur les performances du cycle :

La figure III-10 montre comment l'efficacité d'échangeur impacte les quantités de chaleur impliquées aux différents points de l'installation. L'augmentation de cette efficacité entraîne inévitablement diminution besoins de chaleur à toute les niveaux sauf l'échangeur, augmente parceque qu'il le contient.



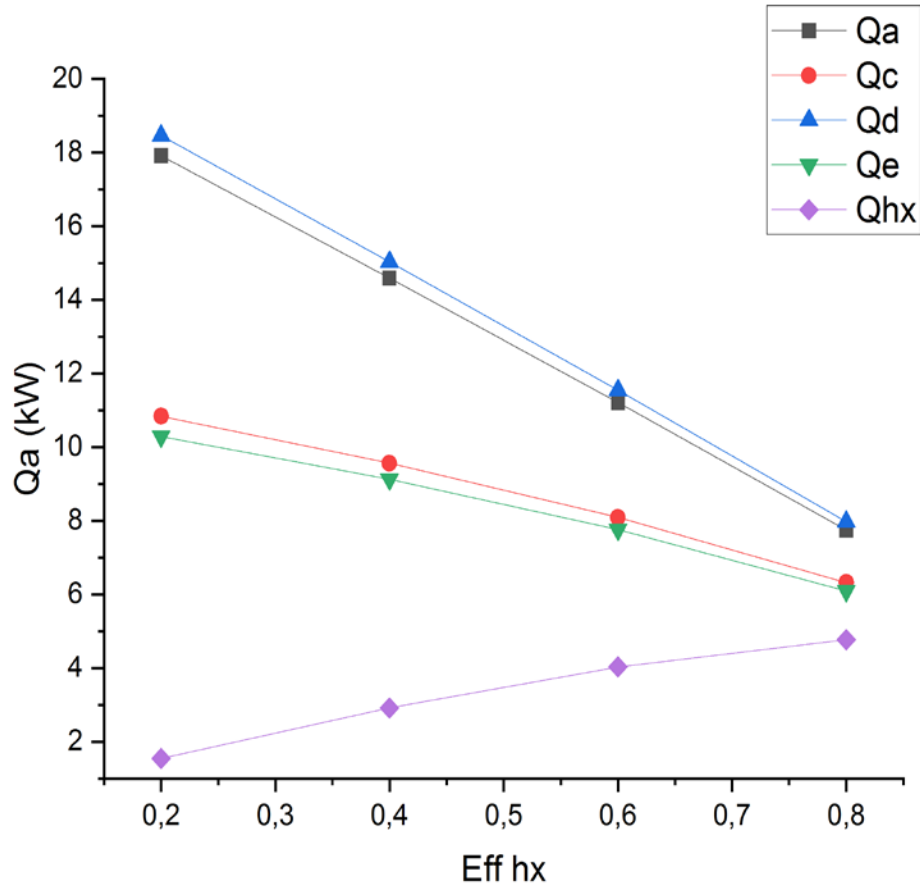
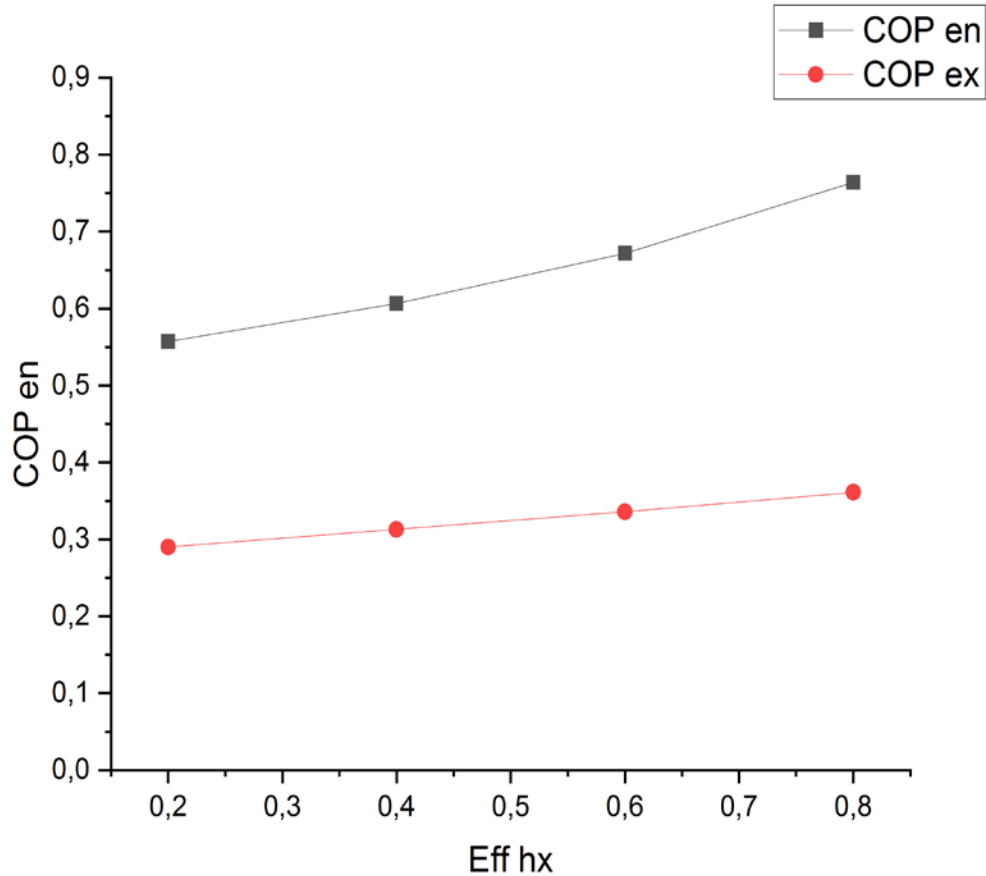


Figure III-10 : Influence d'efficacité d'échangeur sur les différent chaleur.

La figure III-11 illustrent l'influence d'efficacité d'échangeur sur le COP en et COP ex, En observe l'augmentation (COP en) de 0.559 à 0.778 et (COP ex) de 0.298 à 0.341 avec l'augmentation de (eff hx) les COP max en valeurs de (eff hx =0.8). Donc la capacité de refroidissement du système.



*Figure III-11 : Influence d'efficacité d'échangeur sur les COP.*

La figure III-12 présente les effets de la charge du générateur sur la capacité de refroidissement et le coût du refroidissement. On observe qu'elle entraîne une nette diminution de la charge de refroidissement de 15.1 à 5.2 kW avec une augmentation de la charge du générateur de 10 à 20 kW. Le coût du refroidissement augmente de 284 à 342 \$/kW avec l'augmentation de la charge du générateur. Cette diminution de la charge de refroidissement est due à l'augmentation de la charge du générateur, ce qui provoque une température de sortie plus élevée du vapeur de réfrigérant quittant le générateur. Cela conduit à une entrée de réfrigérant à plus haute température dans l'évaporateur en raison de la charge fixe du condenseur, ce qui diminue la capacité de refroidissement du système. La diminution de la charge de refroidissement a des effets négatifs sur le coût du refroidissement, comme observé dans la figure III-12. Cette augmentation du coût de refroidissement résulte d'une production de refroidissement moindre du système pour une taille de système identique.

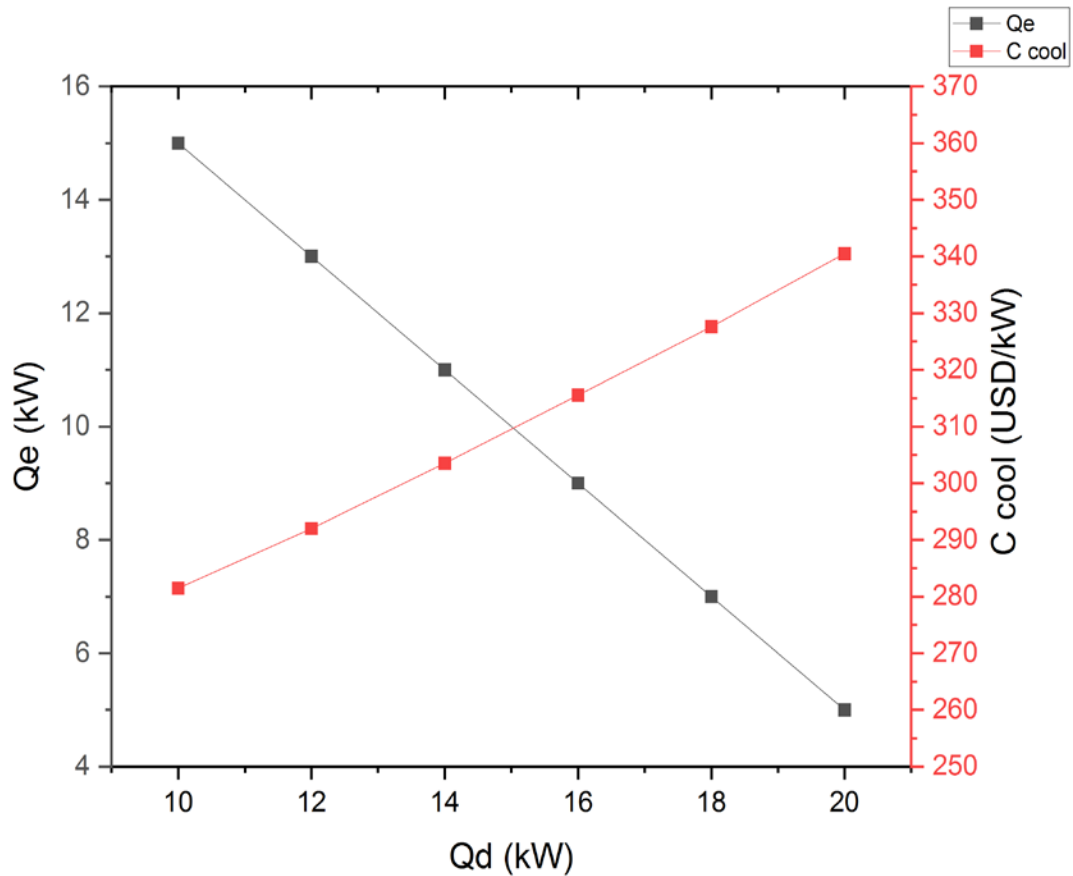


Figure III-12 : Les effets de la charge du générateur sur la capacité de refroidissement et le coût du refroidissement.

La figure III-13 Présenté les effets de la variation de la concentration de la solution forte sur la charge de refroidissement et le coût du refroidissement. On observe que la capacité de refroidissement diminue de 16.02 à 6.8 kW avec une augmentation de la concentration de la solution forte de 0,5 à 0,6. Ce comportement s'explique par le fait qu'une augmentation de la concentration ajoute plus LiBr au générateur. Cette concentration accrue d'LiBr nécessite une charge de générateur plus élevée pour le séparer de la solution. Comme la charge du

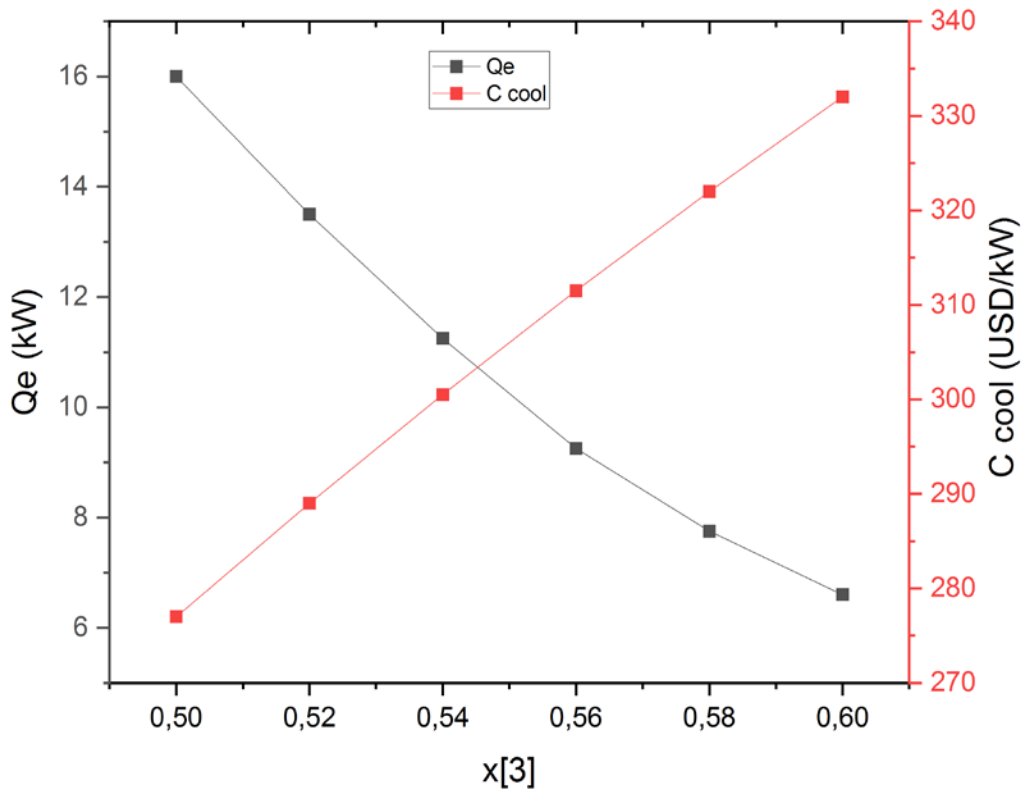


Figure III-13 : effets de la variation de la concentration de la solution forte sur la charge de refroidissement et le coût du refroidissement

générateur reste constante, la plus grande quantité d'LiBr ne peut pas se séparer de la solution forte et augmente plutôt la température du vapeur de réfrigérant d'LiBr sortant du générateur. Ce vapeur d'LiBr à température plus élevée nécessite un rejet d'une plus grande quantité de chaleur dans le condenseur pour fournir une meilleure capacité de refroidissement. Cependant, avec la contrainte que la charge du condenseur est fixée, le vapeur d'LiBr ne peut pas rejeter la quantité plus élevée de chaleur et entre dans l'évaporateur à une température relativement plus élevée, ce qui diminue à son tour la capacité de refroidissement du système. En conséquence, le coût du refroidissement est observé à augmenter de 278 à 333 \$/kW avec une augmentation de la concentration de la solution forte.

### III.10. Conclusion :

Ce chapitre présente une simulation d'une installation de réfrigération à absorption à simple effet. Le modèle thermodynamique utilisé basé sur les bilan énergétique, exergetique massique et économique. Cependant, en raison des hypothèses adoptées, notamment celles concernant les points de saturation de la solution binaire aux différents niveaux spécifiés, le modèle ne peut pas reproduire de manière exacte les systèmes réels de réfrigération à absorption.

Malgré ces limitations, à travers la simulation réalisée, le modèle permet de prédire Nous avons constaté que l'augmentation de température de désorbeur accélère le processus de désorption, elle entraîne inévitablement une augmentation des besoins en chaleur au niveau de l'absorbeur et du condenseur donc le COP en et COP ex diminue ce qui augmenter le coût du refroidissement.

Augmentation de la concentration de la solution forte de x [3] diminue le COP en et COP ex Cette tendance explique par le fait que les COP sont directement liés à la capacité de refroidissement. Sous la contrainte où la charge du condenseur est fixée, le vapeur de LiBr ne peut pas dissiper une quantité accrue de chaleur, entraînant ainsi son entrée dans l'évaporateur à une température relativement plus élevée. Cela se traduit par une diminution de la capacité de refroidissement du système, ce qui augmenter le coût du refroidissement.

Améliorer l'efficacité de l'échangeur de chaleur dans une machine de réfrigération par absorption peut augmenter le COP énergétique (en réduisant la consommation d'énergie pour une même capacité de refroidissement) et le COP exergetique (en améliorant l'utilisation efficace de l'énergie thermodynamique). Cela se traduit par un système de réfrigération plus efficace et potentiellement plus économique.

**CONCLUSION GENERALE :**

Les systèmes de réfrigération par absorption solaire représentent une avancée significative vers une utilisation plus durable des ressources énergétiques. En remplaçant l'énergie électrique par des sources vertes comme l'énergie solaire thermique, ces systèmes contribuent à réduire l'empreinte carbone tout en offrant une solution viable pour les régions où l'accès à l'électricité est limité. Cette transition vers les énergies renouvelables favorise également une plus grande autonomie énergétique et une stabilité à long terme des coûts d'exploitation, tout en renforçant la résilience des infrastructures face aux fluctuations des prix de l'énergie conventionnelle.

L'objectif de cette étude est d'analyser la machine à absorption à travers une simulation numérique visant à une étude énergétique et exergetique et économique (exergoéconomique) cette simulation a été conduite par EES.

Une présentation des systèmes de réfrigération par énergie solaire et systèmes d'absorption avec leurs avantages et inconvénients, déferant composants et principe de fonctionnement.

Analyse exergoéconomique est évaluer l'efficacité énergétique d'un processus tout en prenant en compte les coûts associés à chaque composant et à son fonctionnement.

Les résultats de la simulation ont conduit à la conclusion suivante :

La variation de la température du fluide générateur au désorbeur entraîne des modifications dans les pressions qui prévalent dans la machine, notamment les pressions de fonctionnement et la valeur correspondante du COP en et COP ex. Cette interdépendance offre des indications importantes pour déterminer la combinaison optimale des pressions de fonctionnement. Il a été observé que (COP en) prend sa valeur maximale (COP en max) = 0.6925 pour une plage de températures de 74.1 à 80.3 °C, et (COP ex) prend sa valeur maximale (COP ex max) = 0.394 pour la température 74 °C.

L'augmentation de cette température (du fluide générateur) accélère le processus de désorption, elle entraîne inévitablement une augmentation des besoins en chaleur au niveau de l'absorbeur et du condenseur.

Lorsque le coefficient global de transfert de chaleur se situe entre 0.256 et 0.341 kW/K le (COP en) atteint son max de 0.6924, correspondant à une plage de capacité frigorifique

de 10.61 à 11.942 kW, et le (COP ex) atteint son maximum de 0.3954 lorsque le coefficient global de transfert de chaleur se situe entre 0.1782 et 0.255 kW/K, correspondant à une plage de capacité frigorifique de 8.127 à 10.598 kW.

La température de rejet de chaleur au niveau d'influence les pressions de travail et le (COP en) et (COP ex). Contrairement à l'effet de la température de désorption, une augmentation de la température de rejet de chaleur entraîne une évolution proportionnelle des pressions de travail. En ce qui concerne le COP en et COP ex, on observe respectivement une diminution de 0.704 à 0.5891 et 0.392 à 0.281, avec une valeur maximale à 15 °C pour les deux.

Les coefficients globaux de transfert de chaleur plus élevés entraînent une augmentation du COP et de la capacité frigorifique. Ces échangeurs dissipent efficacement l'excès de chaleur, ce qui permet d'atteindre des performances relativement élevées. Cependant, ils augmentent le coût.

Le (COP en) et (COP ex). Les COP énergétiques et exergetiques diminuent respectivement de 0.695 à 0,521 et de 0,378 à 0,289 avec une augmentation de la concentration de la solution forte s'explique p que les COP sont directement liés à la capacité de refroidissement.

L'augmentation de température d'évaporateur entraîne inévitablement une augmentation des besoins en chaleur au niveau de l'absorbeur et du condenseur et diminution besoins en chaleur au l'échangeur de chaleur.

L'augmentation de température de l'évaporateur de 5 à 20°C peut augmente le COP énergétique de 0.6307 à 0.7292 et diminution de (COP ex) de 0.3702 à 0.241. Cela est dû au fait que les COP dépend directement de la différence de température entre la source chaude et la source froide (l'évaporateur)

L'augmentation de cette efficacité entraîne inévitablement diminution besoins de chaleur à toute les niveaux sauf l'échangeur, augmente par ce que qu'il le contient.

L'influence de l'efficacité de l'échangeur de chaleur (eff hx) sur le COP en et le COP ex de système. D'après les valeurs que vous avez fournies, l'efficacité de l'échangeur de chaleur

a augmenté de 0,559 à 0,778 pour le COP en et de 0,298 à 0,341 pour le COP ex, lorsque l'efficacité de l'échangeur (eff hx) atteint 0,8.

L'augmentation de la charge du générateur entraîne une diminution de la capacité de refroidissement du système en raison de l'augmentation de la température d'entrée du réfrigérant dans l'évaporateur. Bien que la charge de refroidissement diminue, les coûts unitaires associés à cette charge augmentent en raison de la hausse des coûts de gestion de la charge du générateur. Cela illustre l'interdépendance complexe entre les charges de refroidissement, les charges de générateur et les coûts opérationnels dans les systèmes de réfrigération.

La concentration accrue de la solution forte dans un système de réfrigération a un impact notable sur sa capacité de refroidissement et ses coûts. En augmentant la concentration de LiBr de 0,5 à 0,6, la capacité de refroidissement diminue de 16,02 kW à 6,8 kW. Cette diminution résulte de la nécessité d'une charge de générateur plus élevée pour séparer l'LiBr de la solution. Malgré une augmentation de la température du vapeur de réfrigérant d'LiBr quittant le générateur, le condenseur ne peut pas gérer efficacement cette chaleur supplémentaire avec sa charge fixe, conduisant à une entrée d'LiBr dans l'évaporateur à une température plus élevée. En conséquence, le coût du refroidissement augmente de 278 à 333 \$/kW avec l'augmentation de la concentration de la solution forte. Ces résultats soulignent l'importance de l'optimisation des paramètres du système pour maintenir l'efficacité tout en gérant les coûts opérationnels.





**Bibliographie:**

- [1] I. Dincer and T.A.H. Ratlamwala, Integrated Absorption Refrigeration Systems, Green Energy and Technology, DOI 10.1007/978-3-319-33658-9\_1
- [2] Errougani Abdelmoussehel, Fabrication et expérimentation d'un réfrigérateur solaire à adsorption utilisant le couple charbon actif-méthanol dans le site de rabat. Thèse de doctorat en physique énergétique, Université Mohammed V, Rabat 2007.
- [3] Qasem Naef A. A, El-Shaarawi Maged A. I, Improving ice productivity and performance for an activated carbon/methanol solar adsorption ice-maker. Solar Energy 98 (2013) 523-42.
- [4] Khairul Habib, Bidyut Baran Saha, Anutosh Chakraborty, Shigeru Koyama, Kandadai Srinivasane, Performance evaluation of combined adsorption refrigeration cycles. Int. J. Refrig 34 (2011) 129-137.
- [5] Hassan H.Z, Mohamad A.A, Al-Ansary H.A, Alyousef Y.M, Dynamic analysis of the CTAR (constant temperature adsorption refrigeration) cycle. Energy 77 (2014) 852-858.
- [6] J. Christopher Reddick, CONCEPTION, CONSTRUCTION ET ANALYSE D'UN SYSTÈME DE RÉFRIGÉRATION À ÉJECTEUR, Québec : UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, 2012, p9. Format PDF.Disponible sur : <https://core.ac.uk/download/pdf/51335189.pdf>
- [7] I. Dincer and T.A.H. Ratlamwala, Integrated Absorption Refrigeration Systems, Green Energy and Technology, p39, DOI 10.1007/978-3-319-33658-9\_1
- [8] Apex energies [en ligne],(6 décembre 2023),disponible sur : <https://www.apexenergies.fr/serre-photovoltaique/limpact-positif-de-lenergie-solaire-sur-lenvironnement/>
- [9] Narváez-Romo, B., Chhay, M., Zavaleta-Aguilar, E. W., & Simões-Moreira, J. R. (2017). A critical review of heat and mass transfer correlations for LiBr-H<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O absorption refrigeration machines using falling liquid film technology. Applied thermal engineering, 123, 1079-1095.
- [10] Elvas, M. C., Peres, I. M., & Carvalho, S. (2012). Making science cooler: Carré's apparatus. In The Circulation of Science and Technology: Proceedings of the 4th International Conference of the European Society for the History of Science. Barcelona, 18-20 November 2010 (pp. 441-449). Societat Catalana d'Història de la Ciència i de la Tècnica.
- [11] R. Daoudi, « Thermo frigo pompe à absorption à eau –bromure de lithium pour hautes température : Modélisation, conception, et analyse exégétique », thèse de doctorat,INPL, 1999

- [12] Duminil M. (2000). Une brève histoire du froid
- [13] Alamy Banque D'Images, Edmond Carré (1833 - 1894) a élaboré le premier réfrigérateur absorption machine à glace, à l'aide d'eau et d'acide sulfurique, [en ligne] disponible sur (<https://www.alamyimages.fr/edmond-carre-1833-1894-a-elabore-le-premier-refrigerateur-absorption-machine-a-glace-a-l-aide-d-eau-et-d-acide-sulfurique-image228931255.html>)
- [14] Noel Jabbour. Intégration des systèmes à absorption solaire de petites puissances aux bâtiments - approche multifonction solaire : chauffage, ECS et rafraîchissement. Autre. INSA de Lyon, 2011.
- [15] Climat, énergie et développement, par Thibault Laconde: Calculer la production réelle d'un panneau solaire,8/05/2024.
- [16] Hadj Abdelkader Meryem, Ben Zenine Fadéla, Modélisation des composants d'un système de rafraîchissement solaire à absorption, Mémoire, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID- Faculté de Technologie ,TLEMCEM, 2013
- [17] Mhimid A, Étude expérimental d'une installation frigorifique solaire à capteur plans.Thèse de doctorat, École national d'ingénieurs de Monastir, Tunisie, 1987.
- [18] Henning H-M, Solar assisted air-conditioning of buildings-an overview. Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1734-1749.
- [19] Ullah K. R, Saidur R, Ping H. W, Akikur R. K, N. H. Shuvo, A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. Renewable and Sustainable Energy Reviews 24 (2013) 499-513.
- [20] MehdiZeyghami, D.Yogi Goswami n, Elias Stefanakos,A review of solar thermo-mechanical refrigeration and coolingmethods. Renewable and Sustainable Energy Reviews 51 (2015) 1428-1445
- [21] Hassan H, Mohamad A. A, A review on solar cold production through absorption technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 5331-5348.
- [22] BL thermodynamics. Absorbeur et désorbeur [en ligne] disponible sur (: <https://bl-thermo.com/fr/absorbeur-et-desorbeur>.)
- [23] Sparber W., Napolitano A. et Melograno P. *Overview on world wide installed solar cooling systems*. Tarragona, Spain : s.n., 2007. 2nd International conference Solar Air Conditioning

- [24] Energie plus, site web, Machine frigorifique à ab/adsorption, disponible sur : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11175#c6324+c6326>, consulté le 20/05/2018
- [25] SCI Gamaça, site web, Climatisation solaire à absorption, disponible sur : <https://www.sci-gamaca.com/thermique5.html>, modifiée le 05/08/2012
- [26] ABC CLIM, site web, Le détendeur thermostatique type et fonctionnement !, disponible sur : <https://www.abcclim.net/detendeur.html>.
- [27] Larousse .Définitions : pompe - Dictionnaire de français. [en ligne] disponible sur : (<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/pompe/62495>)
- [28] Bensaad, Djihed, Diagnostic de fuites internes dans une pompe à pistons axiaux, thèse de doctorat, 2019
- [29] La thermodynamique appliquée aux systems énergétiques, Echangeurs de chaleur, Université PSL, Paris.
- [30] Chiche, Samuel , Intégration de sources urbaines de chaleur fatale au sein d'un réseau de chaleur, these, 2020/01/10
- [31] Soteris A. Kalogirou, « Solar thermal collectors and applications », Progress in Energy and Combustion Science, vol. 30, no 3, 2004
- [32] le panneausolaire.net, Les différents types de capteurs , disponible sur : <https://www.lepanneausolaire.net/les-differents-types-capteurs>.
- [33] Ohio State University. Heat Pump Theory. *Center for Excellence Absorption Technology*. [En ligne] 17 February 2001. [Citation : 17 March 2008.] <http://rclsgi.eng.ohio-state.edu/~christ-r/ceat/theory/theory.html>.
- [34] Mouad D, Étude du fonctionnement d'une machine frigorifique a adsorption modelisation des transferts de chaleur et de masse et optimisation du fonctionnement de la machine, thèse de doctorat, Université henri poincaré, Nancy (1) 1996.
- [35] Marcriss R, Gutraj J, Zawacki T, Absorption fluid datasurvey: final reporton worldwide data, ORLN/sub/8447989/3.Inst.GasTech1988.
- [36] Le goff P, Energétique industrielle, Technique et documentation, 1, Paris 1979.
- [37] Energy basics. Key Definitions and terms [en ligne]. (modifier le 20 novembre 2022). disponible sur : <https://www.energybasics.org/definitions-of-key-concepts>
- [38] M. Feidt, Energétique concepts et applications. Paris: Dunod, 2006, p. 964.

[39] Rabah,Touaibi, Simulation d'un système de rafraichissement solaire par absorption.[en ligne],Oran :Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf,2013, 100p .disponible sur : ([http://www.univ-usto.dz/theses\\_en\\_ligne/doc\\_num.php?explnum\\_id=2244](http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=2244)) (consulté le 27 /11/2013)