



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj –Bouira-

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

ROUANE Karim

BELABBAD Abderrahim

Spécialité : génie mécanique

Option : Energétique

Thème :

**Etude et simulation d'un système de réfrigération
à absorption eau/bromure de lithium**

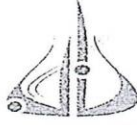
Soutenu le 28/06/2025

Devant le jury Président :

Président : Mr.LEKHL Rachid-MCB-

Examineur : Mr.AHMANACHE Abdennacer -MCB-

Encadrant :Mr.ABERKANE Sofiane -MCA-



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.


انا الممضي اسفله،

السيد(ة) بلعباء عبد الرحيم الصفة: طالب، استاذ، باحث طالب
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 108299139 والصادرة
بتاريخ: 2018/03/16

المسجل(ة) بكلية / كلية العلوم التطبيقية قسم هندسة ميكانيكية طاقوية
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها: Etude et simulation d'un système de réfrigération
à absorption eau / bromure de lithium
تحت إشراف الأستاذ(ة): أبركان مزيان

أصح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 21/06/2021


توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

% 20,9

الامضاء:





نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.


انا الممضي اسفله،

السيد(ة) روان كريع الصفة: طالب، استاذ، باحث طالب
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 406374549 والصادرة
بتاريخ 23/07/2025

المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم التطبيقية قسم هندسة ميكانيكية طاقوية
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها: Etude et simulation d'un système de réfrigération
à absorption eau / bromure de lithium
تحت إشراف الأستاذ(ة): أبركان صان

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 21/06/2025


توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

% 20.9

الامضاء:



Remerciements

Toutes les personnes qui nous ont permis de mener à bien Ce travail
sont assurées de notre gratitude.

Nous tenons à remercier tout particulièrement notre encadreur Mr.
ABERKANE Sofiane.

Pour ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de cette
recherche.

Et tous les enseignants de génie mécanique pour leur aide et conseils.

Et sans oublier tous les étudiants de cette promo.

Nos remerciements s'adressent aux membres du Jury qui Nous font
l'honneur de participer à la Soutenance.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

A mes chers parents

Mes frères mes sœurs et à tout ma famille.

Mon binôme

Mes amies à l'université option énergétique

Abderrahim

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

A mes chers parents

Mes frères mes sœurs et à tout ma famille.

Mon binôme

Mes amies à l'université option énergétique

Karim

Résumé :

L'objectif de notre travail est de réaliser une modélisation et simulation d'une machine frigorifique absorption simple effet utilisant le couple (H₂O/LiBr).

La simulation du modèle de la machine a absorption simple effet eau/bromure de lithium a été effectuée avec l'outil de simulation ASPEN PLUS. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les données trouvées de littérature.

Mot clés : Modélisation, simulation, machine frigorifique a absorption, ASPENPLUS, la machine a absorption eau/bromure de lithium.

Abstract:

The aim of our work is to model and simulate a single-acting absorption machine was simulated using the ASPEN PLUS simulation tool. The results obtained are in good agreement with the data found in the literature

Keywords: modeling, simulation, absorption refrigeration machine, ASPEN PLUS, absorption machine water/lithium bromide.

الملخص:

يهدف عملنا إلى القيام بنمذجة ومحاكاة آلة تبريد بالامتصاص ذات تأثير واحد باستخدام الزوج (H₂O/LiBr) تمت محاكاة نموذج آلة التبريد بالامتصاص ذات التأثير الواحد باستخدام الماء/بروميد الليثيوم بواسطة أداة المحاكاة ASPEN PLUS. وقد أظهرت النتائج المتحصل عليها توافقاً جيداً مع المعطيات الموجودة في الأدبيات. الكلمات المفتاحية: النمذجة، المحاكاة، آلة تبريد بالامتصاص، ASPEN PLUS، آلة الامتصاص ماء/بروميد الليثيوم

Sommaire

Remerciements	
Résumé	
Abstract.....	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Liste des indices	
Introduction générale.....	1
Introduction générale.....	1
Structure de mémoire	1
Chapitre 01:étude bibliographique sur les machines a absorption.....	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Histoire du froid.....	3
I.3. Définition d'une machine frigorifique	4
I.4. Type de machine frigorifique.....	4
I.4.1. machine frigorifique à compression de vapeur	4
I.4.2. Machine frigorifique à absorption.....	6
I.4.2. Machine frigorifique à éjection (jet de vapeur)	7
I.5. Système a absorption.....	8
I.5.1.Composantes d'une machine à absorption	8
I.6 Les couples classiques utilisés dans l'absorption.....	9
I.6.1. Machine à absorption H_2O / NH_3	9
I.6.2. Machine à absorption $H_2O / LiBr$	10
I.6.3. Comparaison entre la machine a absorption et la machine à compressions	11

I.7. type de machine à absorption LiBr/ H ₂ O:.....	12
I.7.1. Système à absorption simple effet.....	12
I.7.2. Système à absorption à double effet.....	13
I.8. comparaison : systèmes à absorption simple effet et double effet.....	14
I.8.1. simple effet	14
I.8.2. double effet	15
I.9. Diagrammes utilisés	15
I.9.1. Diagramme d'Oldham.....	15
I.9.2. Diagramme de Merkel	16
I.10. Conclusion	18
Chapitre 02:modélisation de la machine a absorption LiBr/H₂O.....	
II.1. Introduction	19
II.2. Objectifs de la modélisation	19
II.3. Présentation le cas d'étude	19
II.3.1. système a absorption simple effet	19
II.3.1.1. Bilan massique et énergétique	21
II.6. Coefficient de performance COP.....	28
II.7. Conclusion.....	29
Chapitre03:Simulation avec le logiciel ASPEN PLUS.....	
III.1. Introduction.....	30
III.2. Hypothèses de point d'état pour le cycle simple effet	31
III.3. les étapes de simulation utilisée pour le cas d'étude simple effet	31
III. 3.1. Première étape	31
III. 3.2. Deuxième étape	32
III. 3.3. Troisième étape.....	33
III. 3.4. Quatrième étape	41
III.4. Les étapes de simulation utilisée pour le premier cas avec des échangeurs.....	42

III.5. Conclusion	46
Chapitre 04: résultats de la simulation et discussion.....	
IV. 1. Introduction.....	47
IV.2. validation des résultats.....	47
IV.2.1. vérification du bilan massique.....	47
IV.2.2. Coefficient de performance en fonction de puissance	47
IV.2.3. résultats de simulation de notre cas d'étude.....	48
IV.3. validation des résultats pour le système simple effet avec des échangeurs de chaleur :	49
IV.4. Conclusion	51
Conclusion générale	52

Liste des figures

Figure 1 : Diagramme énergétique d'une machine frigorifique	4
Figure 2 : machine frigorifique à compression mécanique	5
Figure 3 : Machine frigorifique a absorption	7
Figure 4 : Machine frigorifique a éjection	8
Figure 5 : Machine a absorption avec NH ₃ / H ₂ O	10
Figure 6 : Machine a absorption avec H ₂ O / LiBr	11
Figure 7 : Machine frigorifique a absorption simple effet	13
Figure 8 : Machine frigorifique a absorption double effet.....	14
Figure 9 : Diagramme de D'Oldham	16
Figure 10 : Diagramme de Merkel	17
Figure 11 : schéma d'une machine de réfrigération par absorption simple effet	20
Figure 12 : Schéma d'un générateur	21
Figure 13 : Schéma d'un condenseur	22
Figure 14 : Schéma d'un évaporateur	24
Figure 15 : Pompe	25
Figure 16 : Absorbeur	26
Figure 17 : Échangeur de solution.....	27
Figure 18 : composants de processus.....	32
Figure 19 : représentation le modèle thermodynamique	32
Figure 20 : pompe de solution.....	33
Figure 21 : Échangeur de solution.....	34
Figure 22 : Générateur	36
Figure 23 : Représentation d'un condenseur.....	38
Figure 24 : Représentation d'un évaporateur.....	39
Figure 25 : Représentation d'un absorbeur	40
Figure 26 : modélisation d'un système de réfrigération a absorption (H ₂ O /LiBr) avec le logiciel ASPEN PLUS	41
Figure 27 : échangeur de chaleur.....	42
Figure 28 : condenseur a air	43
Figure 29 : Évaporateur avec échangeur de chaleur.....	43
Figure 30 : Absorbeur avec échangeur de chaleur	44

Figure 31 : modélisation d'un système de réfrigération a absorption (H ₂ O/LiBr) avec des échangeurs par le logiciel ASPEN PLUS.	45
---	----

Liste des tableaux

Tableau 1 : Avantages et inconvénients entre deux machines frigorifiques	12
Tableau 2 : Paramètres de fonctionnement pour un système simple effet.....	20
Tableau 3 : hypothèses pour la simulation.....	31
Tableau 4: Débit massique pour (LiBr/ H ₂ O).....	47
Tableau 5 : Comparaison des performances entre notre étude et l'étude expérimentale de Liao.X.	48
Tableau 6 : Résultats de simulation pour le système simple effet.....	49
Tableau 7 : les valeurs de (UA) de notre étude et les valeurs de Liao.X.....	50

Nomenclature

Symboles	Description	Unités
U	Coefficient d'échange global	$W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$
COP	Coefficient de performance	Sans dimension
H	Enthalpie massique	Kj/Kg
Q	Puissance	Kw
P	Pression	Pa,bar
T	Température	$^\circ C$
X	Concentration de solution	(%)
\dot{m}	Débit massique	Kg/s
DTLM	Moyenne logarithmique des écarts de température	$^\circ C$

Liste des indices

Abs	absorbeur
Gén	générateur
Con	condenseur
Évap	évaporateur
RHX	échangeur



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

La réfrigération occupe une place essentielle dans notre quotidien, que ce soit pour la conservation des aliments ou pour le maintien de conditions thermiques confortables dans les habitations et les lieux de travail. Actuellement, les systèmes de climatisation et de réfrigération les plus répandus sont les machines à compression de vapeur. Cependant, ces dispositifs présentent plusieurs inconvénients majeurs, notamment une consommation élevée d'énergie électrique et un rejet important de chaleur dans l'atmosphère, contribuant ainsi à l'augmentation de la température ambiante et aux émissions de gaz à effet de serre.

Face à ces problématiques, il devient indispensable de développer des alternatives plus durables, capables de réduire à la fois la consommation énergétique et l'impact environnemental. L'une de ces alternatives est la réfrigération par absorption, une technologie connue depuis plus d'un siècle. Contrairement aux systèmes traditionnels à compression de vapeur, la réfrigération par absorption utilise un couple réfrigérant/absorbant pour produire du froid, ce qui permet un fonctionnement différent, souvent alimenté par des sources de chaleur, notamment renouvelables.

Les systèmes à absorption présentent de nombreux avantages : ils utilisent des fluides frigorigènes peu nocifs pour l'environnement, n'émettent pas de gaz à effet de serre directs, et leur consommation en énergie électrique est significativement réduite [1].

Cette étude a pour objectif d'analyser et de simuler le fonctionnement d'un système de réfrigération à absorption utilisant le couple eau/bromure de lithium ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$). Elle vise à évaluer ses performances énergétiques et thermodynamiques en fonction des conditions de fonctionnement et des paramètres influents. La modélisation et la simulation permettront ainsi de mieux comprendre le comportement du système et d'identifier les leviers d'optimisation pour une utilisation à la fois efficace et respectueuse de l'environnement.

Structure de mémoire :

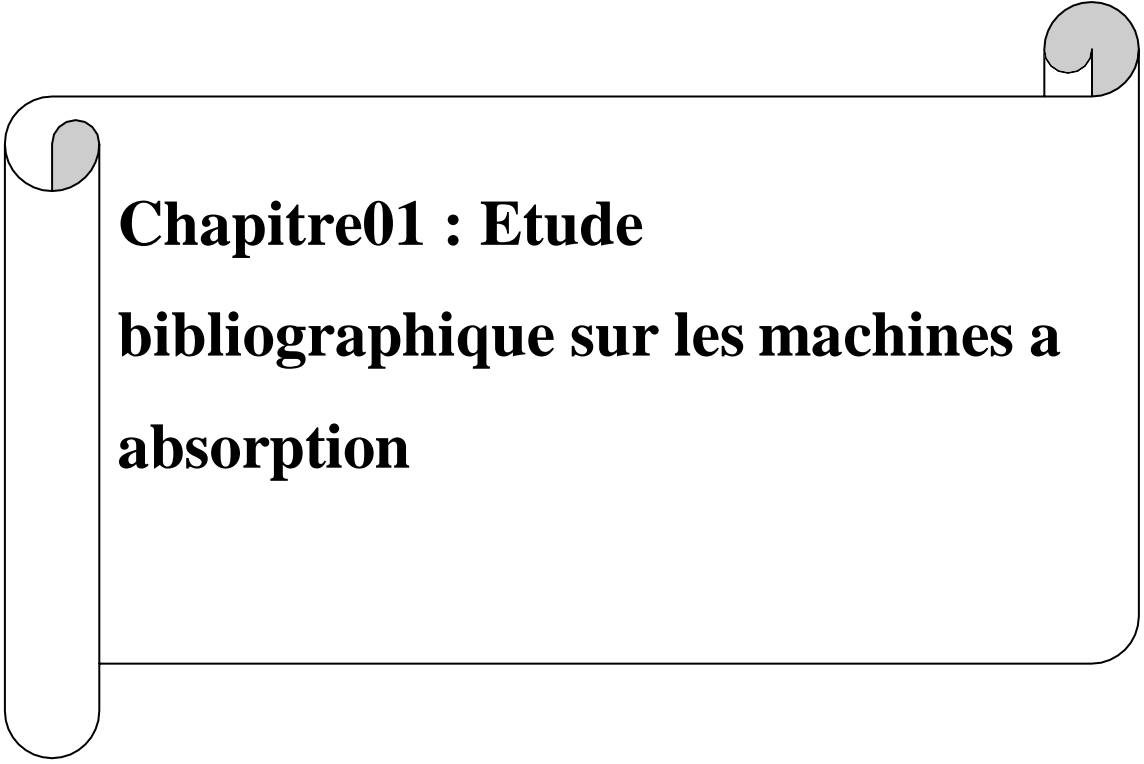
Le premier chapitre a été consacré à une recherche bibliographique portant sur les systèmes de réfrigération par absorption. Il y a été présenté un aperçu historique du froid, une définition des machines frigorifiques à absorption ainsi qu'une classification de leurs différents types. Les avantages et les inconvénients de cette technologie y ont également été discutés.

Introduction générale

Le deuxième chapitre a abordé la modélisation du cycle de réfrigération à absorption, accompagnée d'une analyse thermodynamique détaillée. Un bilan massique et énergétique a été effectué pour chacun des composants du cycle, afin de mieux comprendre leur fonctionnement et leur interaction au sein du système.

Dans le troisième chapitre, l'accent est mis sur la modélisation par simulation et l'importance des simulateurs dans ce domaine. Pour faciliter nos recherches, nous avons choisi d'utiliser le logiciel Aspen Plus.

Dans le quatrième chapitre de notre étude, nous approfondissons les résultats obtenus et menons des discussions pertinentes sur leur signification et leurs implications.



Chapitre01 : Etude bibliographique sur les machines a absorption

I.1. Introduction :

La réfrigération par absorption intervient dans le domaine de la climatisation ainsi que dans de nombreuses applications industrielles à l'échelle mondiale. Face aux difficultés croissantes liées à l'accès à l'énergie et à la nécessité de solutions durables, l'étude des machines de réfrigération à absorption s'impose comme une alternative prometteuse. Ces systèmes sont en effet reconnus pour leur capacité à fonctionner avec des sources d'énergie propres, gratuites et renouvelables, ce qui en fait des solutions à la fois économiques et écologiques.

Ce chapitre est consacré à une revue bibliographique sur les machines frigorifiques à absorption. Il présente l'historique de leur développement, leur principe de fonctionnement, ainsi qu'une classification des différents types de systèmes existants.

I.2. Histoire du froid :

La production de froid est une technologie relativement récente à l'échelle de l'histoire humaine. Bien avant l'avènement des systèmes modernes, les civilisations grecques et romaines conservaient la glace récoltée en hiver dans des abris souterrains, isolés avec des matériaux naturels comme la paille ou le foin. Cette méthode leur permettait de maintenir au frais aliment et boissons durant la saison estivale. À cette époque, on découvrit également qu'un mélange de glace pilée et de sel marin permettait d'abaisser davantage la température.

Ce n'est qu'au XIXe siècle que la production de froid connut un développement significatif, notamment grâce aux avancées dans le domaine de l'électricité. Un acteur clé de cette évolution fut l'inventeur français Ferdinand Carré (1824-1900), qui breveta en 1859 une machine à absorption continue fonctionnant avec le couple frigorigène ammoniac-eau.

L'étude thermodynamique des systèmes de réfrigération par absorption débuta en 1913 grâce aux travaux de l'ingénieur allemand Edmund Altenkirch, et se poursuivit durant la première moitié du XXe siècle. Parmi les contributions notables, on peut citer celles de l'Italien Guido Maïuri, ainsi que celles des Suédois Von Platen et Munters, qui, dans les années 1920, développèrent un cycle à absorption-diffusion sans pompe destiné aux réfrigérateurs.

Dans les années 1940, les États-Unis virent apparaître un nouveau type de machine à absorption utilisant le couple eau-bromure de lithium, avec l'eau comme fluide frigorigène. Cette variante du cycle de Carré est encore largement utilisée aujourd'hui, notamment dans les systèmes de climatisation à absorption. [2]

I.3. Définition d'une machine frigorifique :

Une machine frigorifique est un dispositif thermodynamique conçu pour produire du froid dans un local ou un système donné, en utilisant une source de chaleur externe ou un apport de travail. Elle permet de transférer de la chaleur d'un milieu à température plus basse vers un milieu à température plus élevée, c'est-à-dire dans le sens inverse du transfert naturel de chaleur. [3]

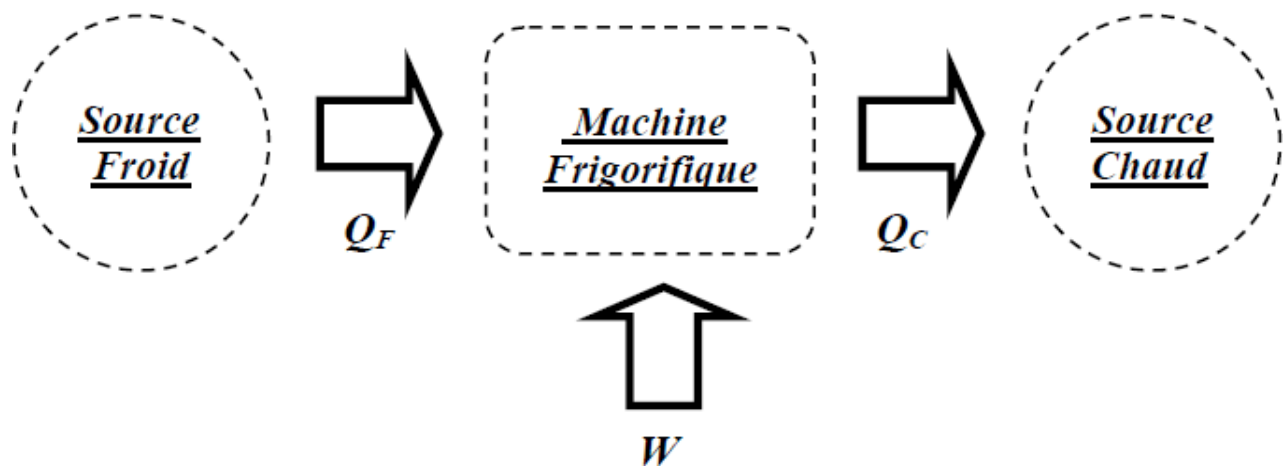


Figure I.1 : Diagramme énergétique d'une machine frigorifique.[3]

I.4. Type de machine frigorifique :

Il existe plusieurs types de machines frigorifiques, généralement classées en fonction de leur principe de fonctionnement. Parmi les principales catégories, on distingue notamment :

I.4.1. machine frigorifique à compression de vapeur :

Le système de réfrigération à compression de vapeur constitue aujourd'hui l'un des procédés les plus couramment utilisés dans les secteurs de la climatisation et de la réfrigération. Ce succès s'explique par son rendement élevé et sa bonne adaptation aux applications de faible à moyenne puissance. Le fonctionnement de ce système repose sur un cycle thermodynamique fermé. Le compresseur aspire le fluide frigorigène à l'état gazeux, puis le comprime, ce qui élève sa pression et sa température. Ce gaz chaud est ensuite dirigé vers le condenseur, où il cède sa chaleur à l'environnement extérieur et se condense pour passer à l'état liquide. Le fluide frigorigène liquide traverse ensuite un détendeur, où sa pression chute brusquement. À l'issue de cette détente, il entre dans l'évaporateur, où il se vaporise en absorbant la chaleur du milieu à refroidir. La vapeur ainsi formée à basse pression et température, est de nouveau aspirée par le compresseur, complétant ainsi le cycle. [4]

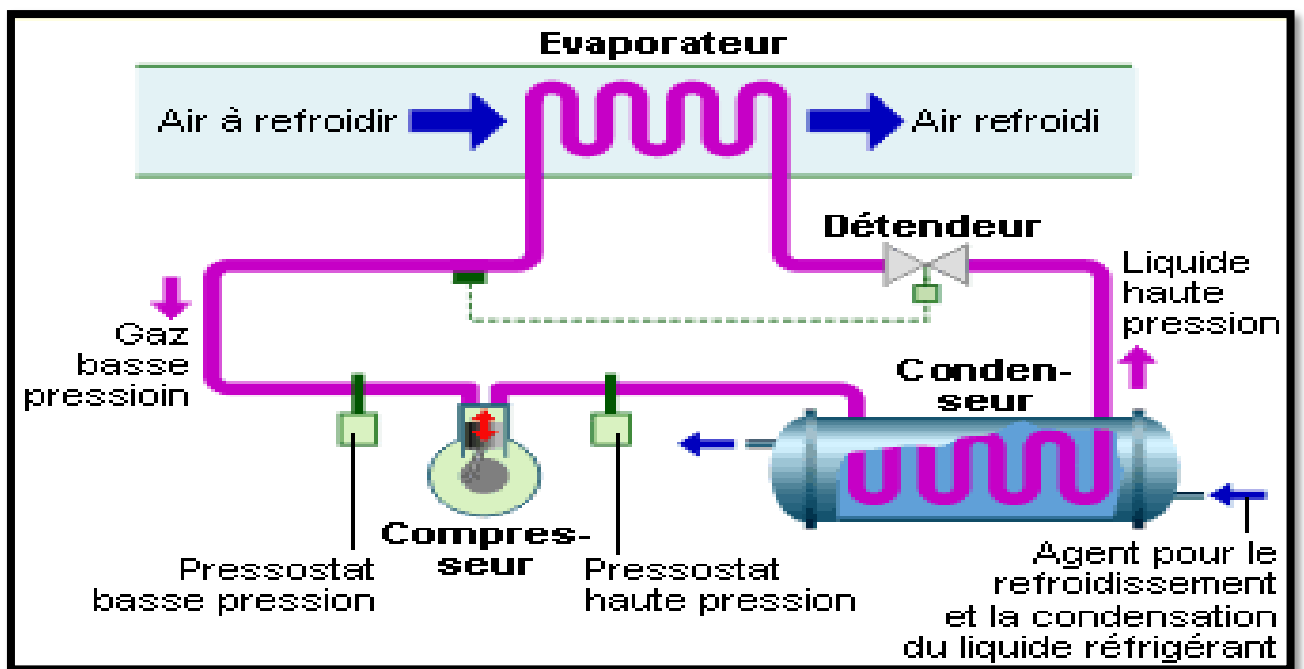


Figure I.2 : machine frigorifique à compression mécanique.[4]

I.4.2. Machine frigorifique à absorption :

Bien que les machines à absorption aient longtemps été moins courantes que les systèmes à compression de vapeur, elles figurent aujourd'hui parmi les rares technologies thermo-frigorifiques en plein développement. Elles sont particulièrement utilisées dans les domaines industriels et commerciaux du refroidissement et de la climatisation, notamment dans les régions où l'énergie électrique est coûteuse ou difficile d'accès. L'un de leurs principaux atouts réside dans leur capacité à fonctionner à partir de diverses sources de chaleur, telles que la vapeur, l'eau chaude, le gaz naturel, ou encore l'énergie solaire.

Le principe de fonctionnement d'un système de réfrigération par absorption repose sur l'utilisation de deux fluides distincts : un réfrigérant et un absorbant. Parmi les couples les plus couramment employés, on retrouve le bromure de lithium (LiBr) avec l'eau en tant que réfrigérant, ainsi que l'ammoniac (NH_3) utilisé comme réfrigérant avec l'eau comme absorbant.

Dans ce type de cycle, le mélange réfrigérant/absorbant— tel que ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) ou ($\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$) —est chauffé à haute température et pression dans le générateur. Sous l'effet de cette chaleur, le fluide frigorigène s'évapore et se sépare de l'absorbant. La vapeur ainsi produite est ensuite dirigée vers le condenseur, où elle se liquéfie en cédant sa chaleur à l'environnement extérieur. Le fluide frigorigène, désormais à l'état liquide et à haute pression, traverse un détendeur où sa pression chute brusquement. Il entre alors dans l'évaporateur, où il se vaporise à nouveau en absorbant la chaleur du milieu à refroidir. Enfin, la vapeur de réfrigérant rejoint l'absorbeur, où elle est absorbée par la solution pauvre issue du générateur, complétant ainsi le cycle. [5]

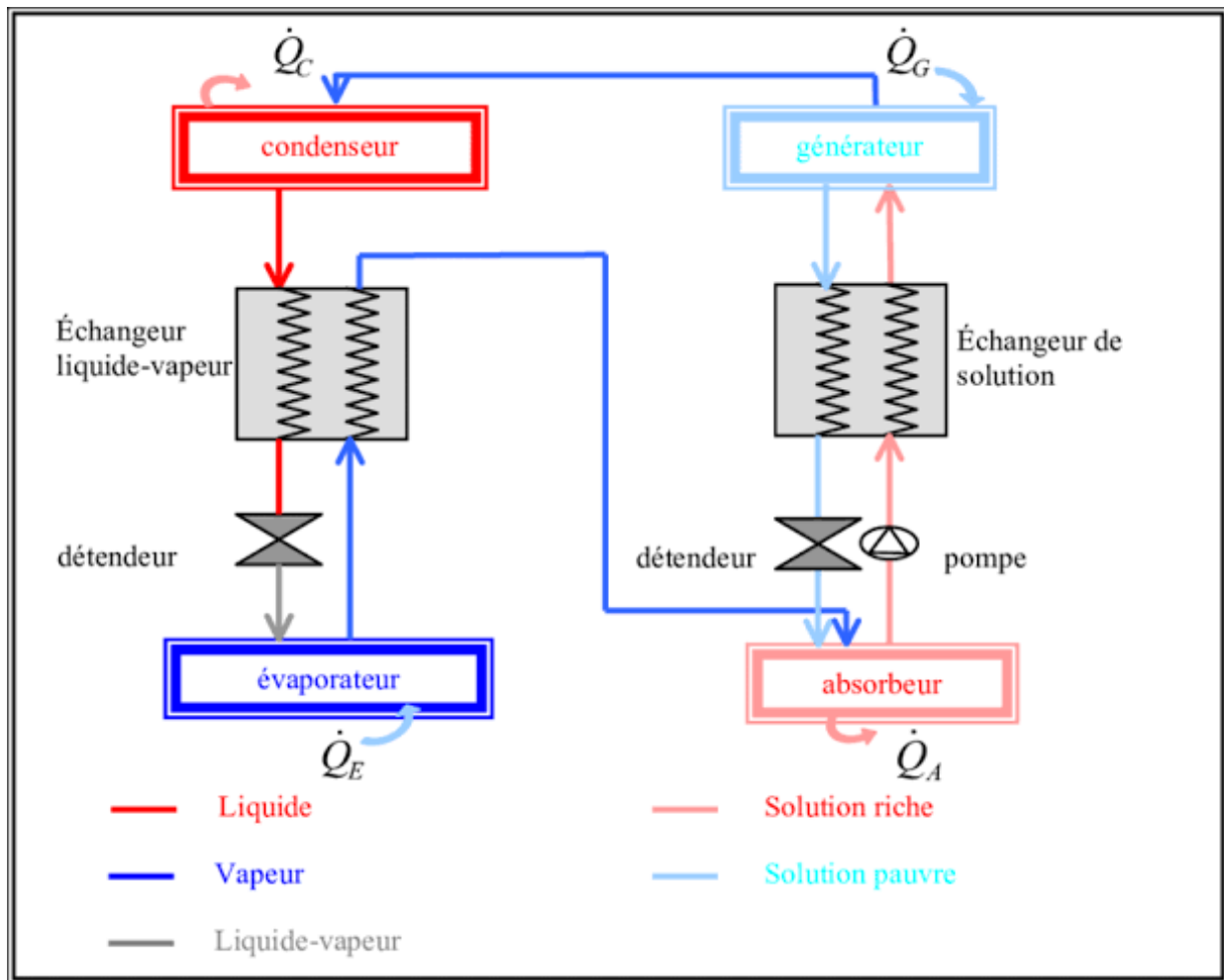


Figure I.3 : Machine frigorifique a absorption.[5]

I.4.2. Machine frigorifique à éjection (jet de vapeur) :

À la différence des systèmes frigorifiques conventionnels qui reposent sur un compresseur mécanique, la machine frigorifique à éjection utilise un éjecteur comme élément central du cycle. Ce dernier fonctionne grâce à l'énergie cinétique d'une vapeur motrice injectée à haute pression et à grande vitesse dans la chambre de l'éjecteur. Ce jet de vapeur crée une dépression qui permet d'aspirer la vapeur provenant de l'évaporateur. Les deux flux se mélangent ensuite et sont comprimés dans un diffuseur avant d'être dirigés vers le condenseur, à une pression intermédiaire.

Ce procédé présente plusieurs avantages, notamment un fonctionnement plus silencieux que celui des systèmes à compression mécanique. Par ailleurs, les machines à éjection peuvent être alimentées par des sources de chaleur alternatives, telles que l'énergie solaire ou la chaleur résiduelle, ce qui en fait une solution particulièrement pertinente dans une démarche d'efficacité énergétique et de valorisation des énergies renouvelables. [4]

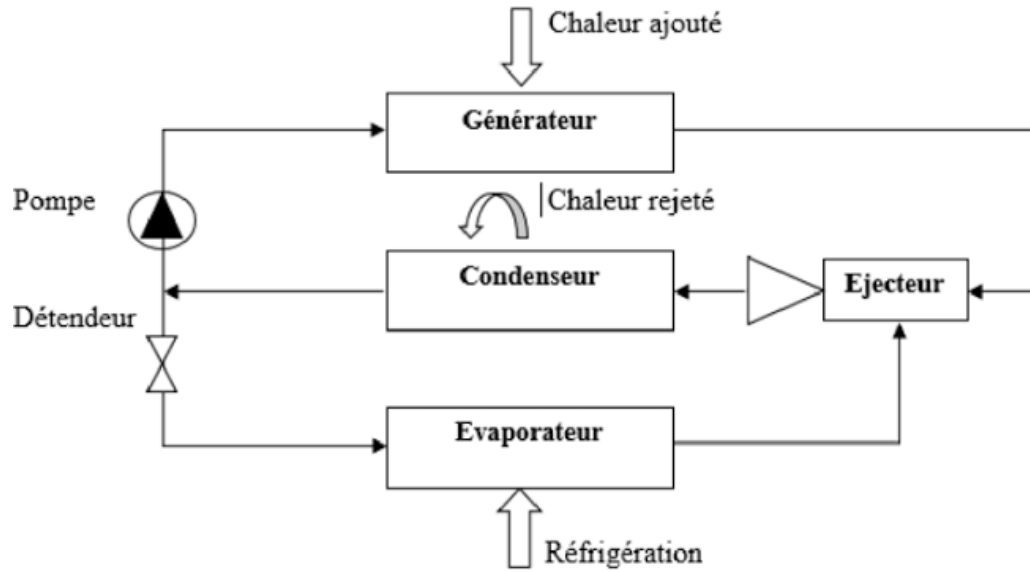


Figure I.4 : Machine frigorifique a éjection. [4]

I.5. Système a absorption :

I.5.1. Composantes d'une machine à absorption :

La machine frigorifique à absorption se devise en quatre composants principaux :

Évaporateur : le fluide frigorigène s'évapore à basse pression et absorbe la chaleur de l'environnement à refroidir. [5]

Absorbeur : capte la vapeur de fluide frigorigène et forme une solution liquide concentrée en frigorigène .cette solution est pompée a une pression plus élevée vers le générateur. [5]

Générateur (bouilleur) : une source de chaleur externe chauffe la solution, provoquant la séparation du fluide frigorigène de l'absorbant.

La vapeur de fluide frigorigène est envoyée vers le condenseur, tandis que l'absorbant est recycle vers l'absorbeur. [5]

Condenseur : la vapeur haute pression cède sa chaleur dans le condenseur et revient à l'état liquide. Le fluide frigorigène liquide passe ensuite par un détendeur avant de retourner dans l'évaporateur, ou le cycle recommence. [5]

I.6 Les couples classiques utilisés dans l'absorption :

Les couples de fluides frigorigène/absorbant utilisés dans les machines à absorption actuelles sont de deux types : [6]

Ammoniac/eau ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$)

Eau /bromure de lithium ($\text{H}_2\text{O} / \text{LiBr}$)

I.6.1. Machine à absorption $\text{H}_2\text{O} / \text{NH}_3$:

Dans les systèmes de réfrigération à absorption utilisant le couple eau/ammoniac ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$), l'ammoniac joue le rôle de fluide frigorigène, tandis que l'eau fait office d'absorbant. Le mélange issu de l'absorbeur est acheminé vers le générateur à l'aide d'une pompe. Sous l'effet de la chaleur fournie au générateur, les deux composants se séparent : l'ammoniac s'évapore à haute température et haute pression. La vapeur obtenue traverse ensuite un rectificateur, qui refroidit légèrement le flux afin de condenser et de retirer une partie de l'eau résiduelle, garantissant ainsi une vapeur d'ammoniac plus pure avant son passage dans le condenseur.

Dans le condenseur, l'ammoniac libère sa chaleur au milieu environnant et se condense à l'état liquide. Ce liquide à haute pression est ensuite détendu à travers un détendeur, ce qui entraîne une forte baisse de pression. Il entre alors dans l'évaporateur, où il se vaporise en absorbant la chaleur du milieu à refroidir. La vapeur d'ammoniac ainsi formée retourne dans l'absorbeur, où elle est de nouveau absorbée par la solution appauvrie en ammoniac en provenance du générateur, bouclant ainsi le cycle. Ce type de système est particulièrement bien adapté aux applications nécessitant des températures de réfrigération relativement basses. [6]

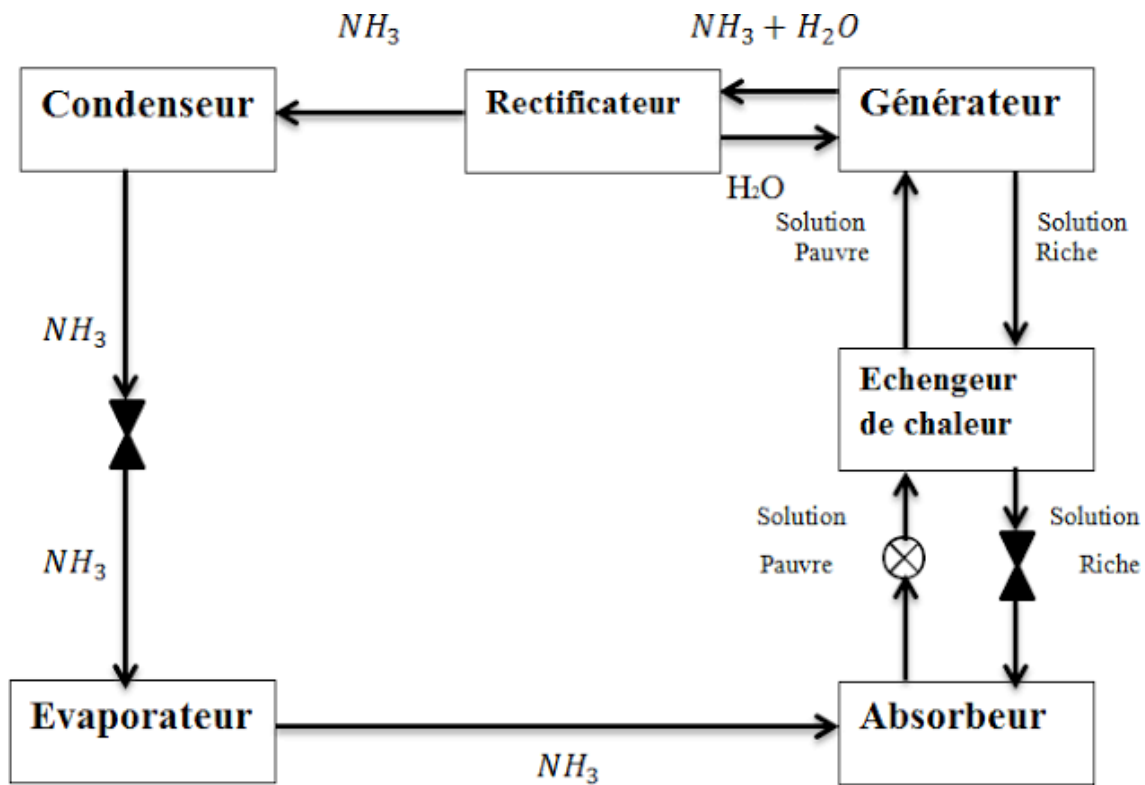


Figure I.5 : Machine à absorption avec $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$. [6]

I.6.2. Machine à absorption $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$:

La machine à absorption utilisant le couple eau/bromure de lithium ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$) est un système de réfrigération thermochimique dans lequel le bromure de lithium agit comme absorbant, facilitant l'absorption de la vapeur d'eau. Dans ce cycle, la solution diluée en LiBr est pompée vers le générateur, où elle est chauffée. Sous l'effet de la chaleur, l'eau contenue dans la solution s'évapore, entraînant la séparation du mélange en deux fractions : d'une part, une vapeur d'eau à haute température et haute pression ; d'autre part, une solution concentrée en bromure de lithium.

La vapeur d'eau est ensuite dirigée vers le condenseur, où elle se liquéfie en cédant sa chaleur à l'environnement. Ce liquide, désormais à haute pression, traverse un détendeur qui abaisse sa pression avant d'atteindre l'évaporateur. À ce stade, l'eau se vaporise à nouveau en absorbant la chaleur du milieu à refroidir. La vapeur ainsi produite entre dans l'absorbeur, où elle est captée par la solution concentrée de LiBr en provenance du générateur, reconstituant une solution diluée. Le cycle peut alors recommencer.

Ce type de système présente toutefois certaines limitations. L'une des contraintes majeures réside dans le point de congélation de l'eau, qui limite son utilisation à des températures de refroidissement modérées, généralement comprises entre 5 °C et 10 °C. Il est donc bien adapté aux applications de climatisation, mais inapproprié pour les besoins en froid négatif. De plus, le fonctionnement à très basse pression—inférieure à la pression atmosphérique—pose des défis Techniques importants, en particulier en ce qui concerne l'étanchéité du système le choix des matériaux compatibles. [5]

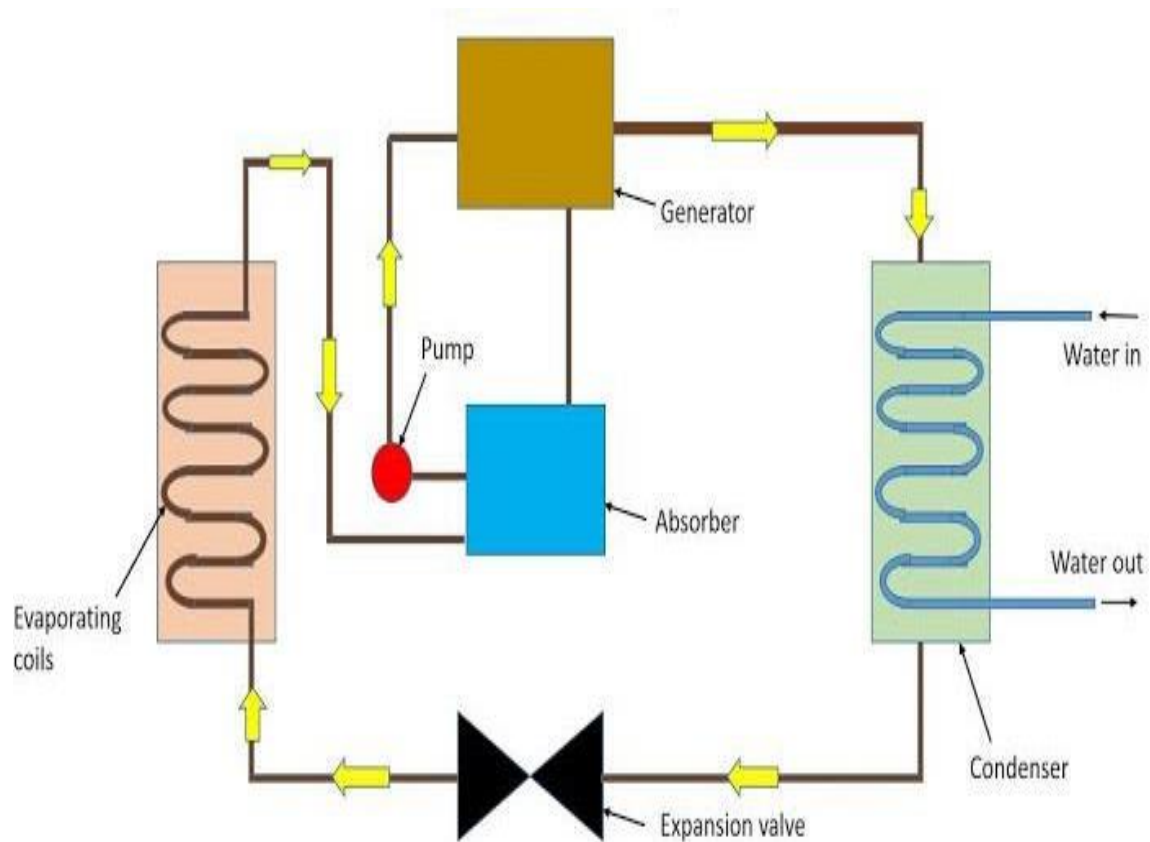


Figure I.6 : Machine a absorption avec H₂O /LiBr. [5]

I.6.3. Comparaison entre la machine a absorption et la machine à compressions :

Dans ce tableau on présente une comparaison entre deux machines frigorifiques les plus utilisés :

Tableau1 : Avantages et inconvénients entre deux machines frigorifiques.

Critère	Machine à compression	Machine à absorption
Fonctionnement	Compression mécanique du fluide frigorigène	Utilisation d'un absorbant +source de chaleur
Avantages	Rendement élevé Compacte et adaptée aux petites puissances	Utilisation de la chaleur (énergie renouvelable ou chaleur perdue) silencieuse
Inconvénients	Bruyante Impacte environnemental	Rendement est faible Système complexe
applications	Climatisation, froid domestique, usage industriel courant	Récupération de chaleur perdue, application silencieuse

I.7. type de machine à absorption LiBr/ H₂O:

Il existe deux types de machine à absorption (simple effet et double effet).

I.7.1. Système à absorption simple effet :

Le système à absorption à simple effet repose sur un cycle thermodynamique comprenant quatre composants principaux : le générateur, le condenseur, l'évaporateur et l'absorbeur. Dans ce cycle, une source de chaleur est utilisée pour chauffer la solution absorbante dans le générateur. Ce chauffage entraîne l'évaporation de l'eau, qui se sépare du bromure de lithium. La solution restante, désormais plus concentrée en LiBr, est ensuite dirigée vers l'absorbeur.

La vapeur d'eau ainsi produite est envoyée vers le condenseur, où elle se liquéfie en cédant sa chaleur à l'environnement. Ce liquide frigorigène traverse ensuite un détendeur, qui réduit sa pression avant son entrée dans l'évaporateur. À ce stade, l'eau se vaporise à basse pression en absorbant la chaleur du milieu à refroidir, générant ainsi l'effet frigorifique recherché.

Enfin, la vapeur d'eau retourne dans l'absorbeur, où elle est absorbée par la solution concentrée de bromure de lithium en provenance du générateur, formant à nouveau une

solution diluée. Cette dernière est pompée vers le générateur, permettant ainsi la fermeture du cycle. [7]

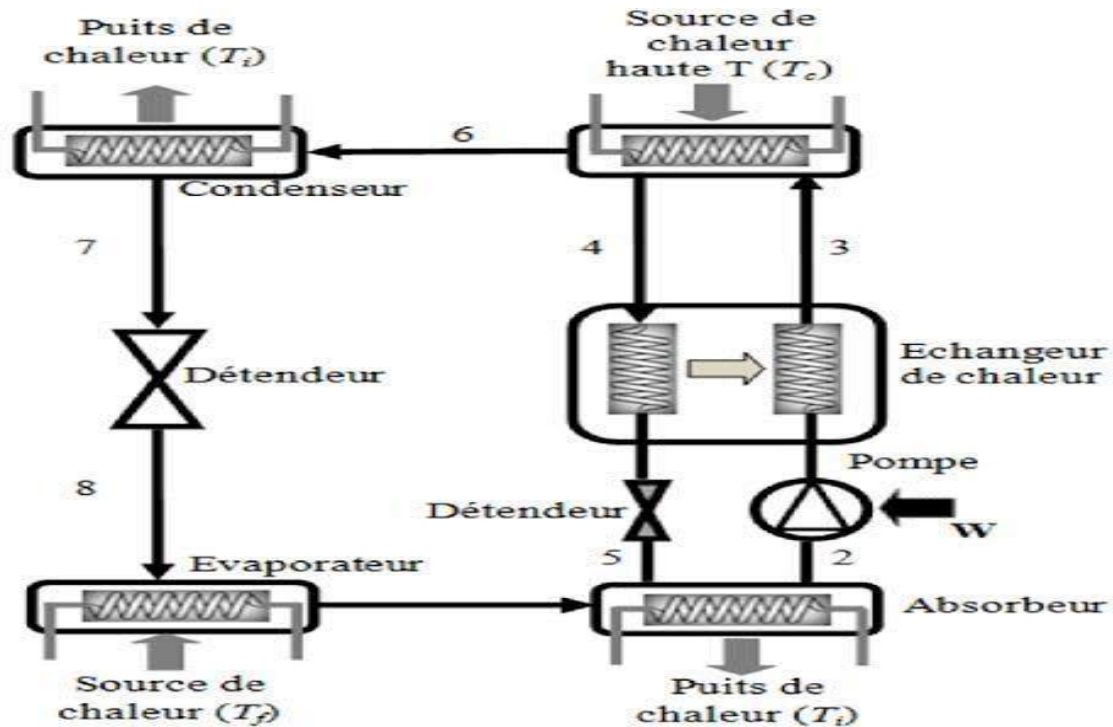


Figure I.7 : Machine frigorifique à absorption simple effet.[7]

I.7.2. Système à absorption à double effet :

Le système de réfrigération à absorption à double effet, introduit entre 1956 et 1958, représente une amélioration notable du cycle à simple effet. Il intègre deux générateurs (un à haute température et un à basse température), un condenseur, un évaporateur, un absorbeur, ainsi que plusieurs échangeurs de chaleur, détendeurs et pompes.

Dans ce cycle, la solution riche en bromure de lithium est d'abord chauffée dans le générateur haute température, ce qui provoque la séparation du fluide frigorigène (généralement de l'eau) de la solution absorbante. La solution désormais concentrée est dirigée vers l'absorbeur, tandis que la vapeur de réfrigérant s'élève vers le second générateur, fonctionnant à plus basse température. Ce second générateur utilise la chaleur de la vapeur entrante pour extraire davantage de réfrigérant à partir d'une solution intermédiaire, optimisant ainsi l'exploitation de l'énergie thermique. La vapeur issue des deux générateurs est ensuite conduite vers le condenseur, où elle se condense en cédant sa chaleur à l'environnement, devenant un liquide à

haute pression. Ce liquide subit ensuite une détente par l'intermédiaire d'un détendeur, ce qui réduit sa pression avant son entrée dans l'évaporateur. Dans celui-ci, le fluide s'évapore en absorbant la chaleur du milieu à refroidir, générant l'effet frigorifique.

Enfin, la vapeur de réfrigérant est absorbée par la solution concentrée en LiBr dans l'absorbeur, formant une solution diluée qui est ensuite pompée vers le générateur haute température, fermant ainsi le cycle.

L'architecture à double effet permet une utilisation plus rationnelle de la chaleur disponible, ce qui se traduit par un rendement énergétique supérieur à celui du système à simple effet. [7]

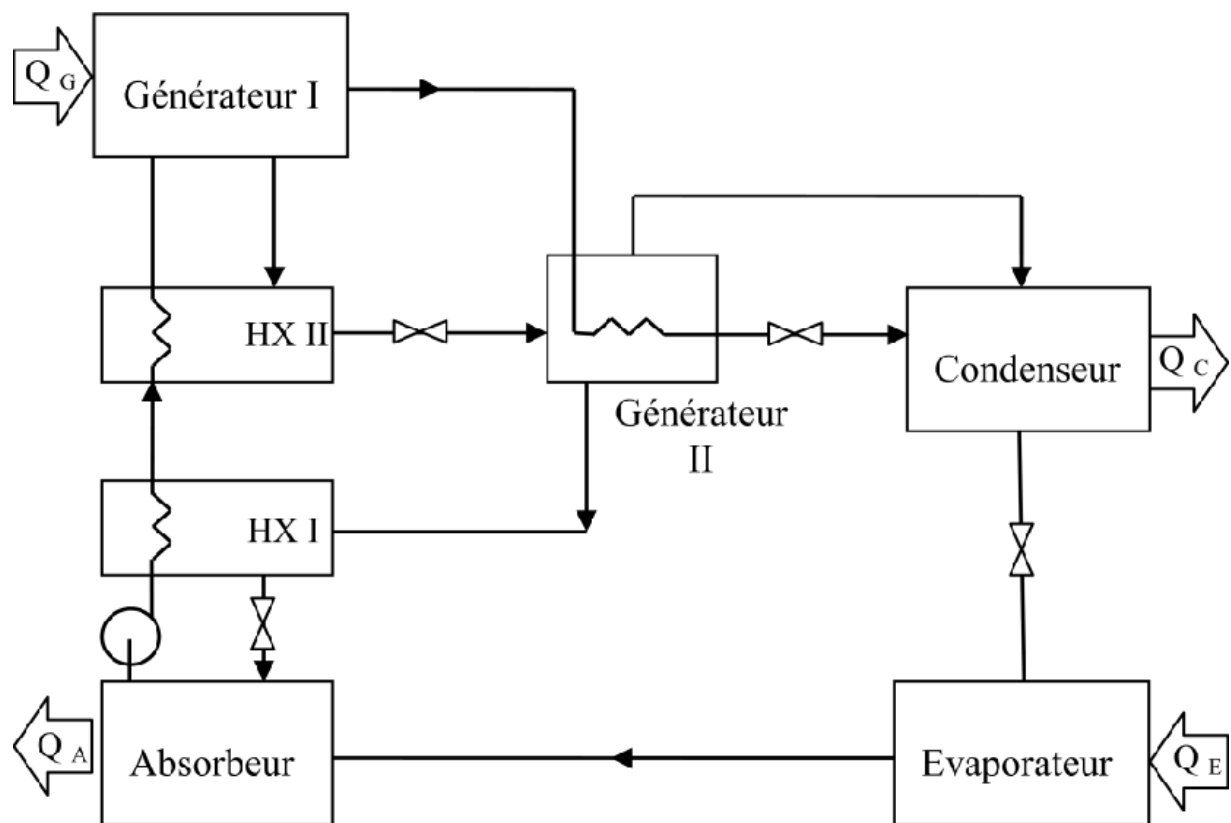


Figure I.8 : Machine frigorifique à absorption double effet.[7]

I.8. comparaison : systèmes à absorption simple effet et double effet :

I.8.1. simple effet :

Avantages :

- La consommation d'électricité est faible.
- Utilisation d'énergie thermique de basse température (80-120 °C).

- Utilisation de fluide non toxique (H_2O).
- Diminution du nombre d'outil.

Inconvénients :

- Moins adapté pour les grandes puissances.
- Sensible aux variations de température ambiante.
- Rendement énergétique faible (0.6-0.8).

I.8.2. double effet :**Avantages :**

- Meilleur rendement énergétique (1.2-1.4).
- Utilisation plus efficace de la chaleur.
- Capacité de refroidissement plus élevée.
- Idéal pour les grandes installations industrielles.

Inconvénients :

- Température de chaleur plus élevée (120-140 °C).
- Système plus compliqué.
- Coûte initiale plus élevé.

I.9. Diagrammes utilisés :

Pour l'analyse des propriétés thermodynamiques du cycle de réfrigération à absorption, on fait généralement appel au diagramme d'Oldham et au diagramme de Merkél. Ces outils permettent de visualiser les états du fluide frigorigène et de l'absorbant à différentes étapes du cycle, facilitant ainsi la compréhension et l'évaluation des performances du système.

I.9.1. Diagramme d'Oldham :

Le diagramme d'Oldham est utilisé pour analyser le cycle de la solution dans une machine à absorption. Il permet de représenter l'évolution de la concentration massique en bromure de lithium (LiBr) en fonction de la température et de la pression, facilitant ainsi la compréhension du comportement thermodynamique du couple $H_2O/LiBr$. [8]

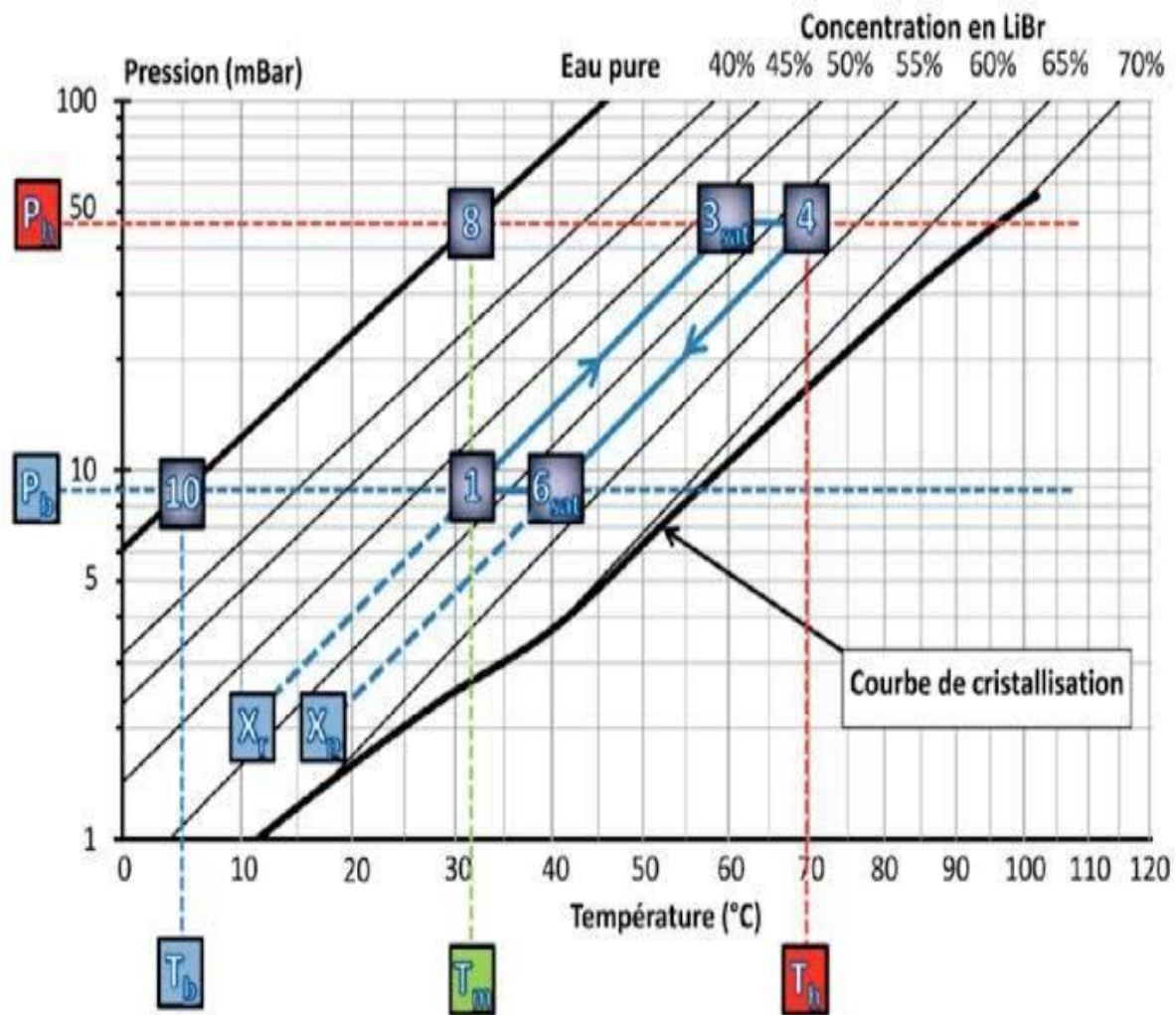


Figure I.9 : Diagramme de D'Oldham. [8]

II.9.2. Diagramme de Merkel :

Le diagramme de Merkél est un outil précieux pour l'analyse détaillée du fonctionnement des machines à absorption. Il permet d'établir les bilans thermiques des différents composants du cycle en visualisant directement les variations d'enthalpie. Dans ce diagramme, l'axe horizontal représente la concentration de la phase liquide (généralement le pourcentage massique de l'absorbant), tandis que l'axe vertical correspond à l'enthalpie. Cette représentation facilite l'évaluation énergétique du cycle et la localisation des principaux transferts thermiques. [8]

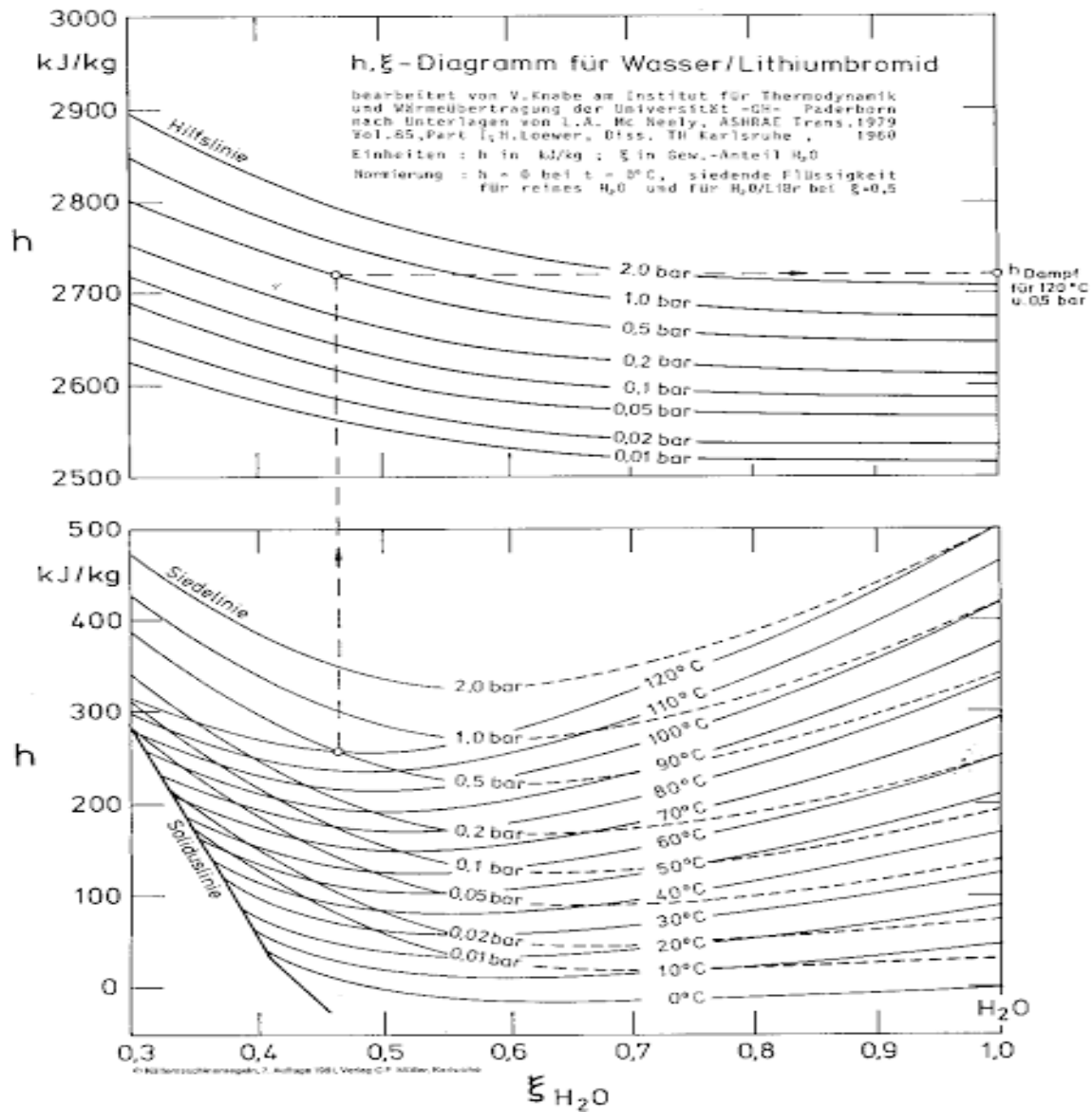


Figure I.10 : Diagramme de Merkel.[8]

I.10. Conclusion :

Ce chapitre a présenté une étude approfondie des machines à absorption, en abordant leur principe de fonctionnement, leurs différents types, ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et à l'analyse thermodynamique du cycle de réfrigération à absorption utilisant le couple eau/bromure de lithium ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$). Une attention particulière sera portée au bilan massique et énergétique de chaque composant du système.

.



Chapitre 02 : Modélisation de la machine a absorption LiBr/H₂O

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, une étude est consacrée à la modélisation d'une machine à absorption à simple effet utilisant le couple eau/bromure de lithium (H₂O/LiBr) en tant que fluide de travail.

Cette analyse a pour objectif d'approfondir la compréhension du fonctionnement de ce type de système et d'identifier des pistes d'optimisation de ses performances énergétiques et thermodynamiques.

II.2. Objectifs de la modélisation :

L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle mathématique rigoureux de la machine à absorption fonctionnant avec le couple H₂O /LiBr. Ce modèle vise à mieux comprendre le comportement thermodynamique du système, à évaluer ses performances énergétiques, et à analyser l'impact des paramètres de fonctionnement sur son rendement global.

II.3. Présentation le cas d'étude :

II.3.1. système a absorption simple effet :

Dans le cadre de cette étude, un exemple de machine frigorifique à absorption à simple effet est présenté, à travers une analyse détaillée de son fonctionnement, de ses composants principaux et de ses performances globales.

Selon la figure **II.1**, la solution riche en bromure de lithium (provenant de l'absorbeur) est envoyée vers le générateur à l'aide d'une pompe. Sous l'action d'une source de chaleur, le générateur provoque la séparation du fluide frigorigène (H₂O) de l'absorbant (LiBr). La solution appauvrie en réfrigérant est ensuite dirigée vers l'absorbeur, tandis que la vapeur d'eau, désormais à haute pression et température, est conduite vers le condenseur.

Dans le condenseur, la vapeur d'eau cède sa chaleur au fluide de refroidissement qui l'entoure, ce qui provoque sa condensation en un liquide sous haute pression. Ce liquide frigorigène passe ensuite à travers un détendeur, où sa pression chute brusquement, avant d'entrer dans l'évaporateur. Dans ce dernier, le fluide s'évapore complètement en absorbant la chaleur du milieu à refroidir, produisant ainsi l'effet frigorifique souhaité.

Enfin, la vapeur d'eau générée est conduite vers l'absorbeur, où elle est absorbée par la solution concentrée de bromure de lithium, formant une nouvelle solution riche. Celle-ci est ensuite pompée vers le générateur, bouclant ainsi le cycle de réfrigération.

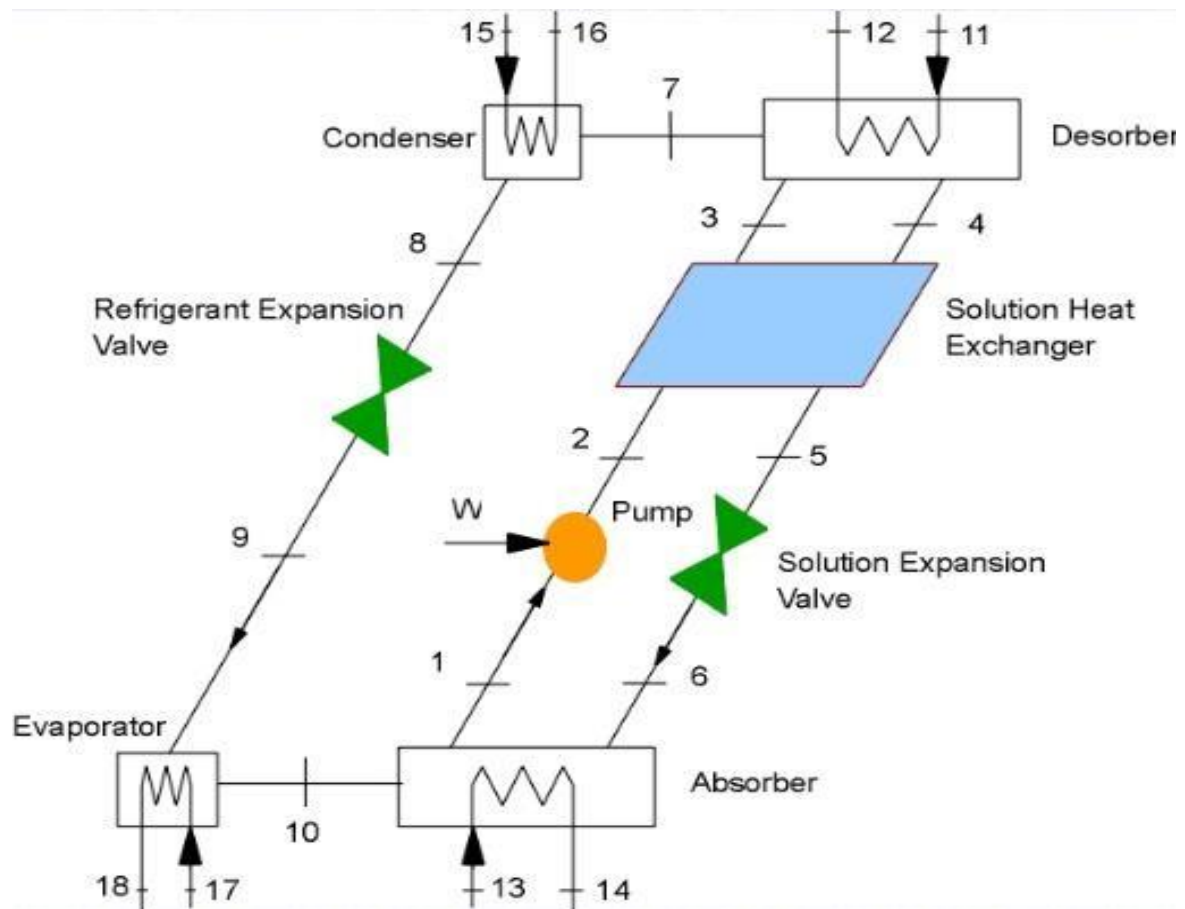


Figure II.1 : schéma d'une machine de réfrigération par absorption simple effet.

Les données utilisées au début de l'étude de cas ce sont des données de Liao.X [9] :

Tableau 2 : Paramètres de fonctionnement pour un système simple effet.

Paramètre	Valeurs
Pression d'évaporation(KPa)	0.758
Pression de condensation(KPa)	7.381
Température d'entrée d'eau (°C)	34.6
Concentration de LiBr pauvre (%)	62.4
Concentration de LiBr riche (%)	56.7
Débit massique total (kg/s)	0.31

II.3.1.1. Bilan massique et énergétique :

Pour évaluer la performance de cycle à absorption simple effet dans la figure (II.1) nous avons fait les hypothèses et les calculs suivant :

- Le système fonctionne en régime permanent.
- Il y a deux pressions (P_{HAUTE} et P_{BASSE}) dans le système, P_{HAUTE} est dans le générateur et le condenseur et P_{BASSE} dans l'évaporateur et l'absorbeur.
- Pas de perte de chaleur dans la tuyauterie.
- Le dispositif d'étranglement est isenthalpique.
- La pompe de solution est adiabatique.
- L'UA de chaque échangeur de chaleur est constante.

Remarque :

Pour la modélisation de chaque composant dans le cycle on utilise le premier principe de la thermodynamique.

La forme générale des équations de conservation de l'énergie et de la masse est :

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_i \quad (\text{II.1})$$

$$\sum \dot{m}_e x_e = \sum \dot{m}_i x_i \quad (\text{II.2})$$

$$\sum Q + \sum W = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (\text{II.3})$$

➤ Générateur :

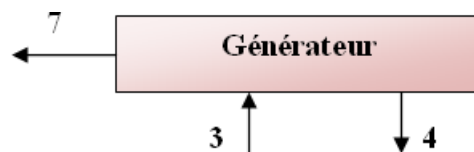


Figure II.2 : Schéma d'un générateur.

Bilan massique :

$$\dot{m}_7 + \dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad (\text{II.4})$$

$$\dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_3 x_3 \quad (\text{II.5})$$

Bilan énergétique :

$$Q_{GE} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3 \quad (\text{II.6})$$

Q_{GE}: Quantité de chaleur fournit au générateur.

h₇ : Enthalpie de la vapeur surchauffée du frigorigène a la température du générateur et a la pression du condenseur.

h₃ : enthalpie du liquide de la solution diluée (riche en H₂O) a la température **T₇** et a la pression du condenseur.

h₄ : Enthalpie du liquide de la solution concentrée (pauvre en H₂O) a la température du générateur et a la pression du condenseur.

➤ **condenseur :**

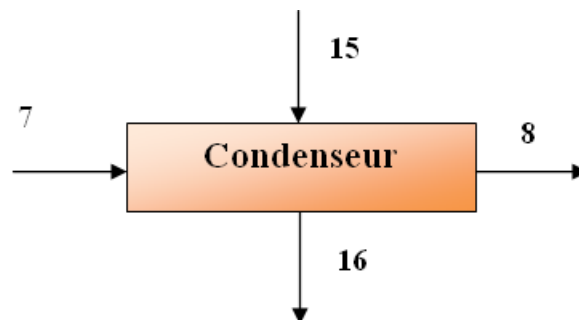


Figure II.3 : Schéma d'un condenseur.

Bilan massique :

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (\text{II.7})$$

Bilan énergétique:

$$Q_{CO} = \dot{m}_7 (h_7 - h_8) \quad (\text{II.8})$$

$$Q_{CO} = \dot{m}_{15} (h_{16} - h_{15}) \quad (\text{II.9})$$

Aussi :

$$Q_{CO} = UA * DTLM_{CO} \quad (\text{II.10})$$

$$DTLM_{CO} = \frac{(T_7 - T_{16}) - (T_8 - T_{15})}{\ln \frac{(T_7 - T_{16})}{(T_8 - T_{15})}} \quad (\text{II.11})$$

Q_{CO} : Quantité de chaleur cédée par le condenseur

\dot{m}_7 : débit massique de réfrigérant.

h₇ : Enthalpie de la vapeur surchauffée du frigorigène a la température du générateur et a la pression du condenseur.

h₈ : enthalpie du liquide saturé du frigorigène a la température du **T_c** et a la pression du condenseur.

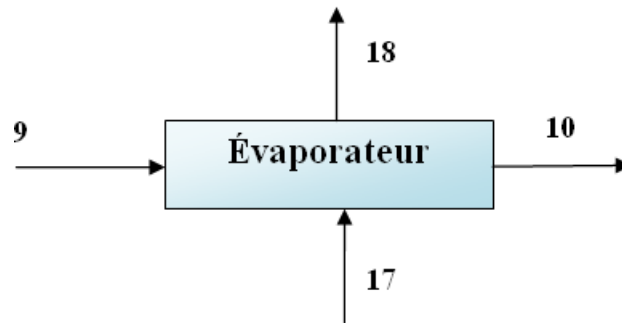
➤ **Évaporateur :**

Figure II.4 : Schéma d'un évaporateur.

Bilan massique :

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (\text{II.12})$$

Bilan énergétique:

$$Q_{EV} = \dot{m}_9 (h_{10} - h_9) \quad (\text{II.13})$$

$$Q_{EV} = \dot{m}_{17} (h_{17} - h_{18}) \quad (\text{II.14})$$

Aussi :

$$Q_{EV} = UA * DTLM_{EV} \quad (\text{II.15})$$

$$DTLM_{EV} = \frac{(T_{17} - T_{18})}{\ln \frac{(T_{17} - T_{10})}{(T_{18} - T_{10})}} \quad (\text{II.16})$$

Q_{EV}: Quantité de chaleur absorbée par évaporateur.

\dot{m}_9 : débit massique de réfrigérant.

h₉: Enthalpie liquide à la température **T₉** et à la pression de l'évaporateur.

h₁₀ : Enthalpie de la vapeur saturée du frigorigène à la température **T_e** et la pression de l'évaporateur.

➤ **pompe :**

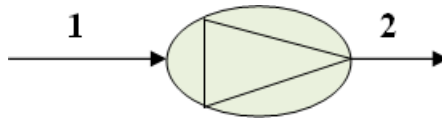


Figure II.5 : Pompe.

Bilan massique :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{II.17})$$

Bilan énergétique:

$$W = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1 \quad (\text{II.18})$$

W_P: Le travail de la pompe de solution.

\dot{m}_2 : Débit massique de solution riche.

h₂: Enthalpie du liquide de la solution riche à la pression du condenseur.

➤ Absorbeur :

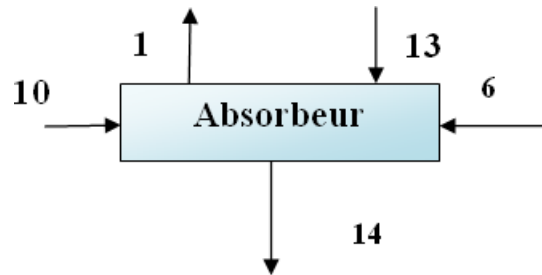


Figure II.6 : Absorbeur.

Bilan massique:

$$\dot{m}_{10} + \dot{m}_6 = \dot{m}_1 \quad (\text{II.19})$$

$$\dot{m}_6 x_6 = \dot{m}_1 x_1 \quad (\text{II.20})$$

Bilan énergétique:

$$Q_{AB} = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_1 h_1 \quad (\text{II.21})$$

Aussi:

$$Q_{AB} = UA * DTLM_{AB} \quad (\text{II.22})$$

$$DTLM_{AB} = \frac{(T_6 - T_{14}) - (T_1 - T_{13})}{\ln \frac{(T_6 - T_{14})}{(T_1 - T_{13})}} \quad (\text{II.23})$$

Q_{AB}: Quantité de chaleur cédée par l'absorbeur.

h₁: Enthalpie du liquide de la solution à la température de l'absorbeur **T_a** et à la pression de l'évaporateur et à la fraction riche.

h₆: Enthalpie du liquide de la solution à la température **T₁₀** à la pression de l'évaporateur et à la fraction pauvre

\dot{m}_1 : Débit massique de solution riche.

\dot{m}_6 : Débit massique de solution pauvre.

➤ **Echangeur de chaleur :**

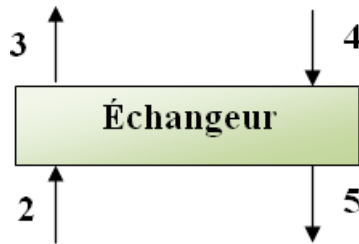


Figure II.7 : Échangeur de solution.

Bilan massique :

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (\text{II.24})$$

$$\dot{m}_2 x_2 = \dot{m}_3 x_3 \quad (\text{II.25})$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (\text{II.26})$$

$$\dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_5 x_5 \quad (\text{II.27})$$

Bilan énergétique:

$$Q_{EC} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (\text{II.28})$$

$$Q_{EC} = \dot{m}(h_4 - h_5) \quad (\text{II.29})$$

Aussi :

$$Q_{EC} = UA * DTLM_{EC} \quad (\text{II.30})$$

$$\text{DTLM}_{\text{EC}} = \frac{(T_4 - T_3) - (T_5 - T_2)}{\ln \frac{(T_4 - T_3)}{(T_5 - T_2)}} \quad (\text{II.31})$$

\dot{m}_2 : Débit massique de solution riche.

\dot{m}_4 : Débit massique de solution pauvre.

Q_{EC} : Puissance thermique échangée de l'Echangeur.

II.6. Coefficient de performance COP:

Le coefficient de performance (COP) d'une machine à absorption est défini comme le rapport entre la quantité de chaleur extraite au niveau de l'évaporateur et la quantité de chaleur apportée au générateur. [12]

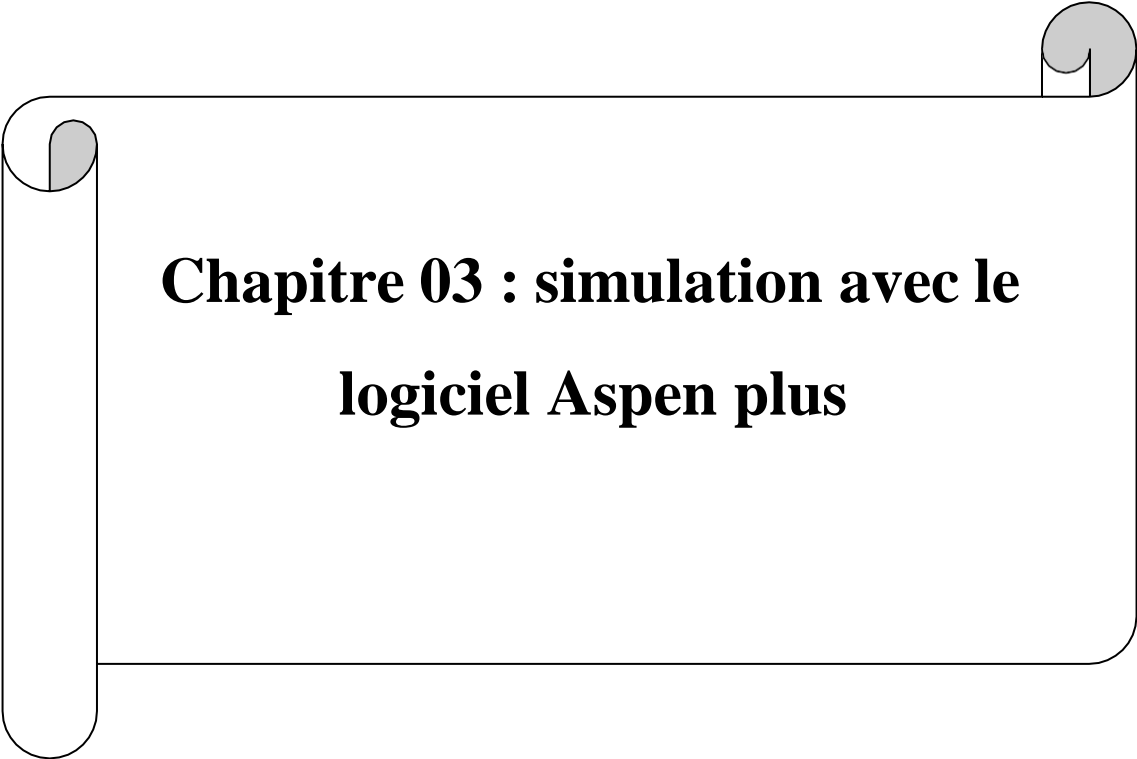
$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{éva}}}{Q_{\text{gén}}} \quad (\text{II.32})$$

Q_{EV} : Quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur.

Q_{GE} : Quantité de chaleur fournit au générateur.

II.7. Conclusion:

Dans ce chapitre, une modélisation approfondie ainsi qu'une analyse thermodynamique du cycle de réfrigération à absorption utilisant le couple eau/bromure de lithium ont été présentées un bilan massique et énergétique a également été établi pour chacun des composants du cycle.



Chapitre 03 : simulation avec le logiciel Aspen plus

III.1. Introduction :

Divers logiciels de simulation sont disponibles pour modéliser les cycles de réfrigération par absorption. Dans ce travail, le choix s'est porté sur Aspen Plus pour représenter ce type de cycle, en raison de ses capacités avancées à modéliser avec précision les différentes étapes du processus ainsi que chacun de ses composants.

Développé par Aspen Tech, Aspen Plus est un outil de simulation de procédés largement utilisé en ingénierie chimique. Il permet la conception, l'analyse et l'optimisation de systèmes complexes grâce à une interface conviviale. L'utilisateur peut y créer des schémas de procédés, intégrer des données telles que les compositions des flux, les paramètres de fonctionnement, et les caractéristiques des équipements, afin de simuler le comportement global du système étudié.

Ce logiciel peut représenter un large éventail de procédés chimiques, incluant les opérations de séparation (comme la distillation ou l'absorption), les réactions chimiques (telles que la combustion ou les réactions catalytiques), ainsi que des procédés physiques comme la cristallisation ou le séchage. Il s'appuie sur des modèles mathématiques sophistiqués pour reproduire fidèlement les phénomènes thermodynamiques et cinétiques, fournissant des résultats détaillés sur des paramètres clés tels que la température, la pression et la composition des flux.

De plus, Aspen Plus intègre des fonctionnalités avancées, telles que la modélisation de systèmes réactionnels complexes, la prise en compte des mélanges non idéaux et multi composants, ainsi que des outils d'analyse de sensibilité et d'optimisation. Sa robustesse et sa flexibilité en font un outil incontournable dans de nombreux secteurs industriels, notamment la chimie, la pétrochimie, la pharmacie et l'agroalimentaire.

III.2. Hypothèses de point d'état pour le cycle simple effet :

Nous avons fait les hypothèses pour la simulation de cycle simple effet.

Tableau 3 : hypothèses pour la simulation

Point d'état	Hypothèse
1	Qualité de vapeur 0
2	Déterminé par le modèle de pompe à solution
3	Déterminé par le modèle SHX
4 et 7	Respectivement liquide saturé et vapeur saturé ; le rapport de débit massique entre les états 4 et 7 est déterminé par la température de la chaleur résiduelle disponible
5	Déterminé par le modèle SHX
6	Déterminé par le modèle de vanne de solution
8	Qualité de vapeur de 0
9	Déterminé par le modèle de pompe à réfrigérant
10	Qualité de vapeur de 1

III.3. les étapes de simulation utilisée pour le cas d'étude simple effet :

III.3.1. Première étape :

La première étape consiste à choisir les composants de ce processus : eau/bromure de lithium ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$).

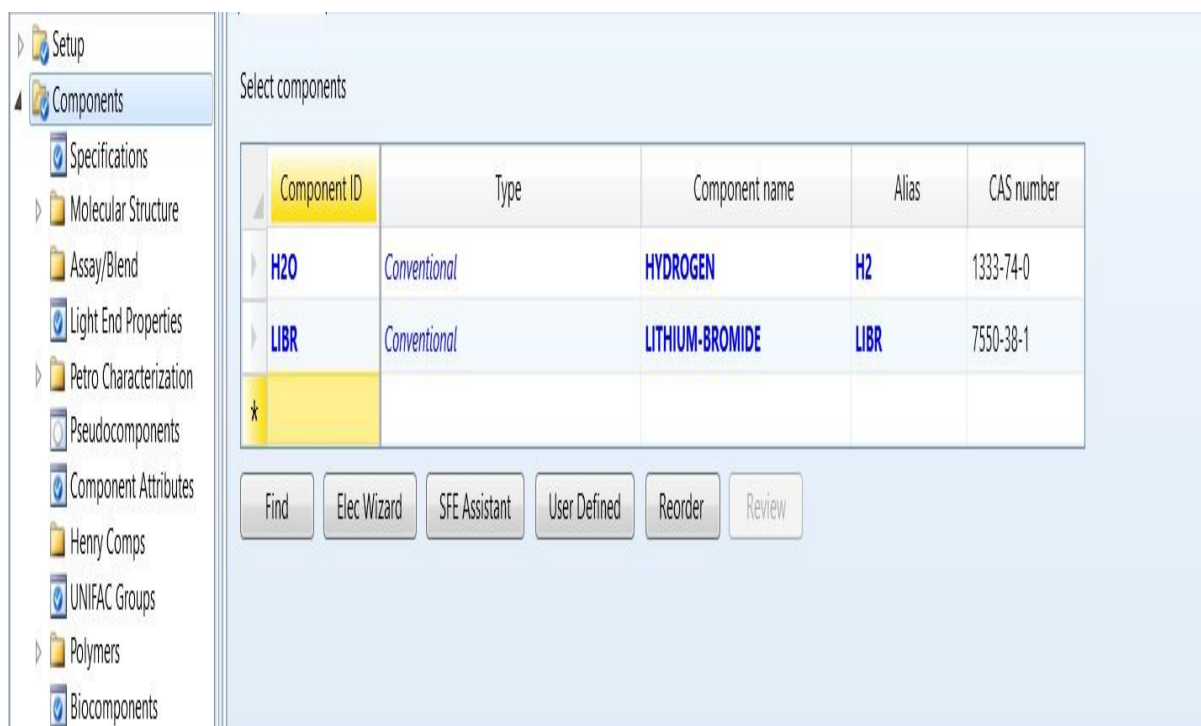


Figure III.1 : composants de processus.

III.3.2. Deuxième étape :

La deuxième étape consiste à choisir le module thermodynamique **ELECNRTL**.

Le model ELECNRTL (Electrolyte Non Random Two Liquid) est un modèle thermodynamique avancée utilisée pour décrire le comportement des solutions électrolytes.

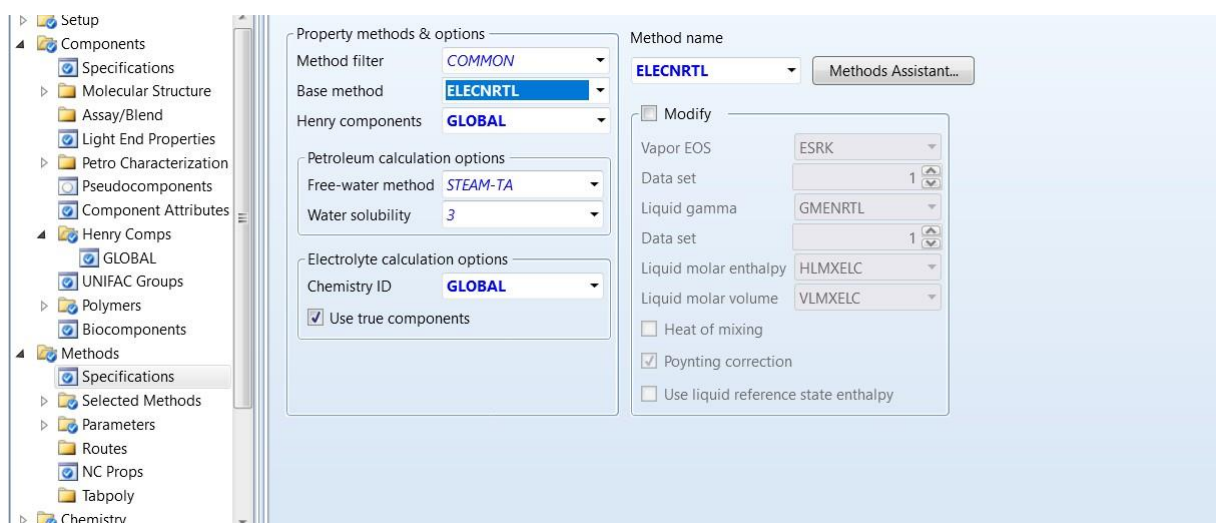


Figure III.2 : représentation le modèle thermodynamique.

III.3.3. Troisième étape :

Dans cette partie on présente les différents éléments de la machine utilisée dans le logiciel ASPEN PLUS ainsi que les données d'entrée pour ces éléments.

➤ Pompe

La pompe est située entre le point 1 et 2 ou son rôle est de pomper la solution riche (LiBr/H₂O) de l'absorbeur vers le générateur.

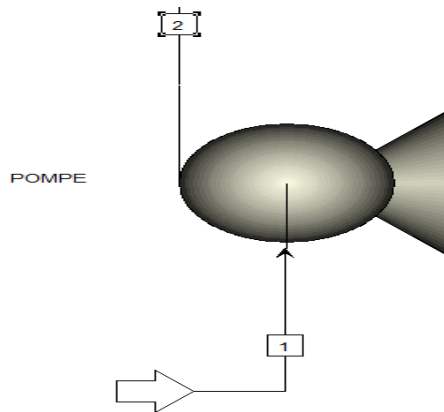


Figure III.3 : pompe de solution.

Point1 :

Specifications

Flash Type: **Pressure** | Vapor Fraction

State variables

Temperature: 33,5 C

Pressure: 0,758 kPa

Vapor fraction: 0

Total flow basis: **Mass**

Total flow rate: 0,31 kg/sec

Solvent:

Reference Temperature

Volume flow reference temperature: C

Component concentration reference temperature: C

Composition: **Mass-Frac**

Component	Value
H2O	0,433
LIBR	0,567
LI+	
BR-	
H+	
HBR	
LIOH	
OH-	
Total	1

Pompe :

Model	
<input checked="" type="radio"/> Pump	<input type="radio"/> Turbine
Pump outlet specification	
<input checked="" type="radio"/> Discharge pressure	7,381 kPa
<input type="radio"/> Pressure increase	bar
<input type="radio"/> Pressure ratio	
<input type="radio"/> Power required	kW
<input type="radio"/> Use performance curve to determine discharge conditions	
Efficiencies	
Pump	Driver

➤ Echangeur de solution:

L'échangeur de solution chauffe la solution riche qui vient de l'absorbeur et le bromure de lithium qui revient du générateur, ce qui provoque de chauffer la solution riche et de refroidir la solution pauvre.

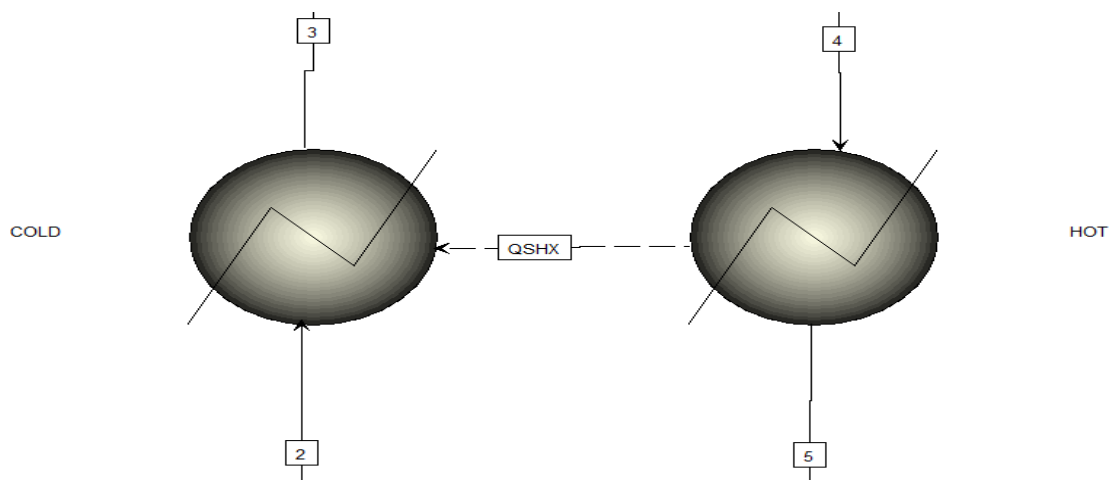


Figure III.4 : Échangeur de solution.

HEAT 1 :

Flash specifications		
Flash Type	Pressure	
Inlet heat stream	Inlet heat stream	
Temperature	63,9	C
Temperature change		C
Degrees of superheating		C
Degrees of subcooling		C
Pressure	7,381	kPa
Duty		cal/sec
Vapor fraction		
Pressure drop correlation parameter		
<input type="checkbox"/> Always calculate pressure drop correlation parameter		
Valid phases		
Vapor-Liquid		

HEAT 2 :

Flash specifications		
Flash Type	Temperature	
	Pressure	
Temperature	54,4	C
Temperature change		C
Degrees of superheating		C
Degrees of subcooling		C
Pressure	0	kPa
Duty		cal/sec
Vapor fraction		
Pressure drop correlation parameter		
<input type="checkbox"/> Always calculate pressure drop correlation parameter		
Valid phases		
Vapor-Liquid		

➤ Générateur :

Le générateur, représenté entre les points 3, 4 et 7 du schéma, est constitué de trois échangeurs de chaleur (**HeatX**) permettant de chauffer progressivement la solution riche en bromure de lithium et eau (LiBr/H₂O) jusqu'à son point d'ébullition. Une fois la température nécessaire atteinte, un séparateur (**Flash**) est utilisé pour séparer la vapeur d'eau du bromure de lithium. La vapeur d'eau ainsi produite est dirigée vers le condenseur, tandis que la solution appauvrie en réfrigérant (LiBr concentré) est renvoyée vers l'absorbeur pour y être

réutilisée.

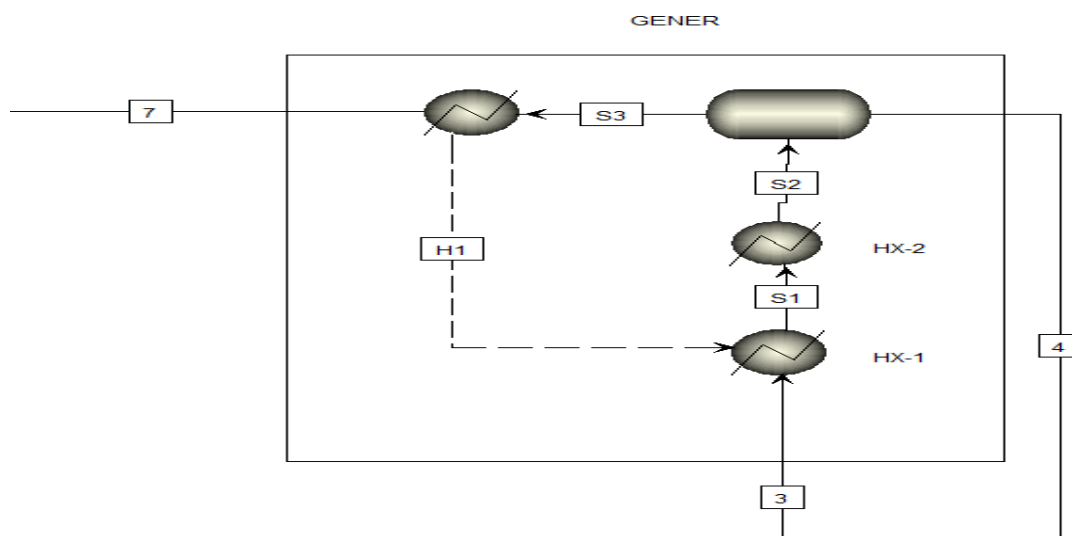


Figure III.5 : Générateur.

Flash specifications	
Flash Type	<div>Temperature</div> <div>Pressure</div>
Temperature	<div>89,6</div> <div>C</div>
Pressure	<div>7,381</div> <div>kPa</div>
Duty	<div></div> <div>cal/sec</div>
Vapor fraction	<div></div>

Valid phases
<div>Vapor-Liquid</div>

➤ **Détendeur:**

Le détendeur réduit la pression du gaz des points 5,6 et 8,9.

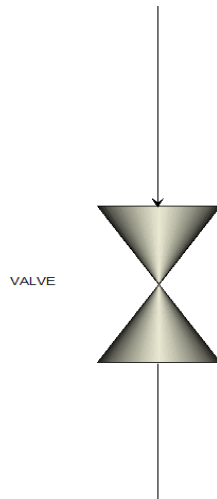


Figure III.6 : Détendeur.

Calculation type	
<input checked="" type="radio"/> Adiabatic flash for specified outlet pressure (pressure changer)	
<input type="radio"/> Calculate valve flow coefficient for specified outlet pressure (design)	
<input type="radio"/> Calculate outlet pressure for specified valve (rating)	
Pressure specification	Valve operating specification
<input checked="" type="radio"/> Outlet pressure <input type="text" value="0,758"/> <input type="text" value="kPa"/>	<input checked="" type="radio"/> % Opening <input type="text" value=""/>
<input type="radio"/> Pressure drop <input type="text" value=""/> <input type="text" value="bar"/>	<input type="radio"/> Flow coef <input type="text" value=""/>
Flash options	
Valid phases <input type="text" value="Vapor-Liquid"/>	Maximum iterations <input type="text" value="30"/>
	Error tolerance <input type="text" value="0,0001"/>

➤ **Condenseur :**

Le condenseur est situé entre les points 8 et 9, où il convertit la vapeur d'eau de l'état gazeux à l'état liquide.

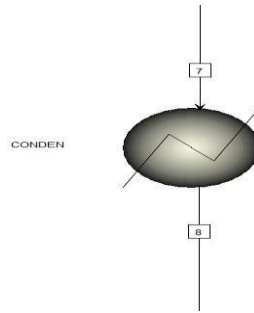


Figure III.7 : Représentation d'un condenseur.

Flash specifications

Flash Type: **Pressure** (dropdown), **Vapor fraction** (dropdown)

Temperature: 40 C (dropdown)

Temperature change: C (dropdown)

Degrees of superheating: C (dropdown)

Degrees of subcooling: C (dropdown)

Pressure: **7,381** kPa (dropdown)

Duty: cal/sec (dropdown)

Vapor fraction: **0**

Pressure drop correlation parameter: (text box)

☐ Always calculate pressure drop correlation parameter

Valid phases: **Vapor-Liquid** (dropdown)

➤ **Evaporateur :**

L'évaporateur est situé entre les points 9 et 10, son rôle est de convertir l'eau de l'état liquide à l'état vapeur en absorbant la quantité de chaleur Q_{EV} du milieu à refroidir.

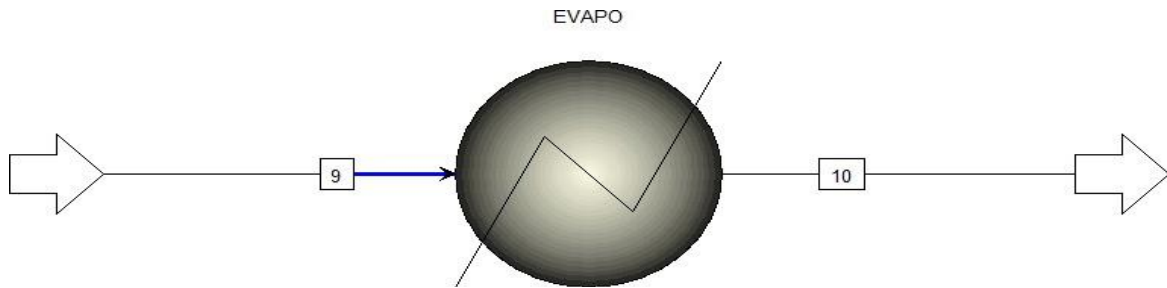


Figure III.8 : Représentation d'un évaporateur.

Flash specifications

Flash Type: **Pressure** (dropdown menu)

Vapor fraction (dropdown menu)

Temperature: [] C (dropdown menu)

Temperature change: [] C (dropdown menu)

Degrees of superheating: [] C (dropdown menu)

Degrees of subcooling: [] C (dropdown menu)

Pressure: **0,758** kPa (dropdown menu)

Duty: [] cal/sec (dropdown menu)

Vapor fraction: **1**

Pressure drop correlation parameter: []

☐ Always calculate pressure drop correlation parameter

Valid phases: **Vapor-Liquid** (dropdown menu)

➤ **Absorbeur :**

L'absorbeur est situé entre les points 6 et 10, où il absorbe la vapeur d'eau venue de l'évaporateur et mélange cette vapeur avec le bromure de lithium.

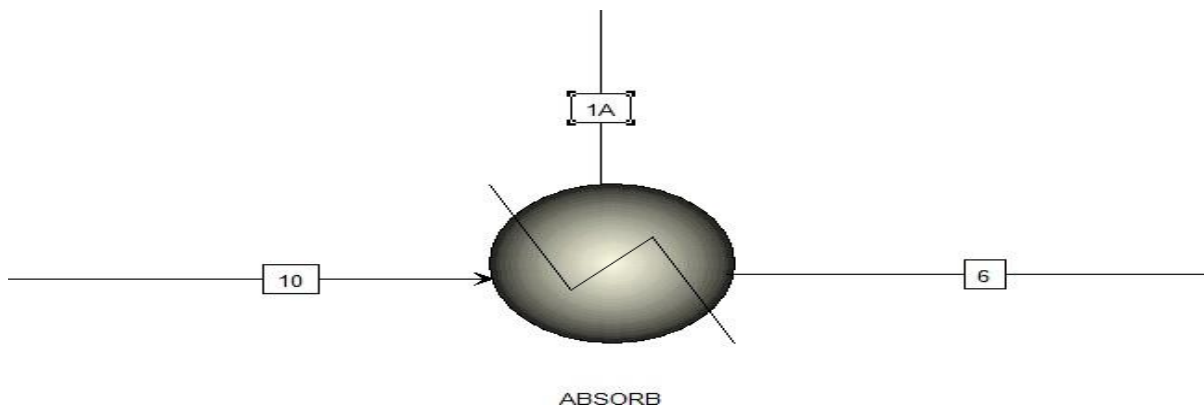


Figure III.9 : Représentation d'un absorbeur.

Flash specifications

Flash Type: **Pressure** (dropdown menu)
Vapor fraction (dropdown menu)

Temperature: 33,5 C (dropdown menu)
Temperature change: C (dropdown menu)
Degrees of superheating: C (dropdown menu)
Degrees of subcooling: C (dropdown menu)
Pressure: 0,758 kPa (dropdown menu)
Duty: cal/sec (dropdown menu)
Vapor fraction: 0
Pressure drop correlation parameter:

☐ Always calculate pressure drop correlation parameter

Valid phases: **Vapor-Liquid** (dropdown menu)

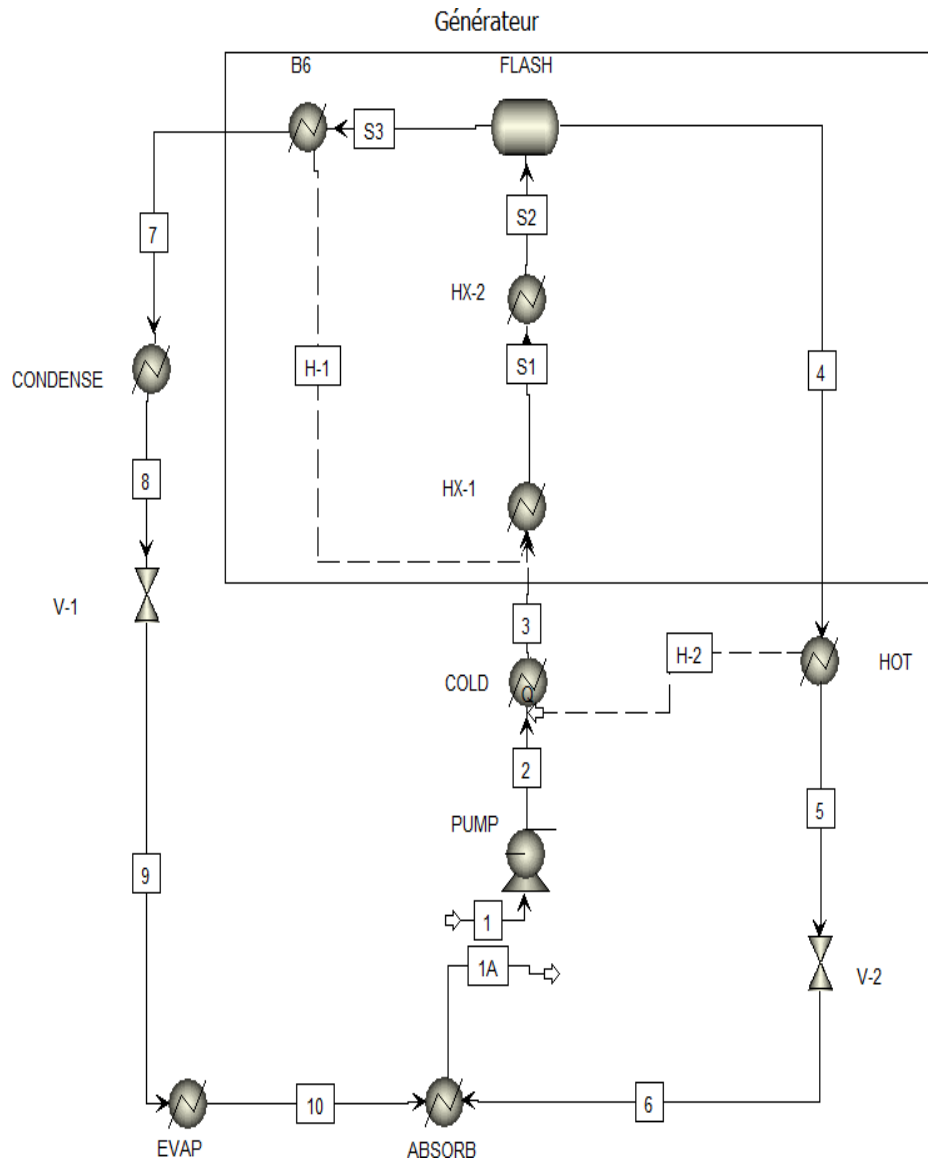


Figure III.10 : modélisation d'un système de réfrigération a absorption (H₂O /LiBr) avec le logiciel ASPEN PLUS

III.3.4. Quatrième étape :

Interprétation des résultats, cette étape consiste à rédiger et analyser les résultats obtenus dans ce processus.

III.4. Les étapes de simulation utilisée pour le premier cas avec des échangeurs :

Dans cette étude on à ajouté des échangeurs de chaleur pour l'échangeur de solution, le condenseur, l'évaporateur et l'absorbeur pour certains raisons :

- Améliorer les performances thermiques.
- Réduire les pertes d'énergie.
- Stabilisation des températures.
- Augmente le coefficient de performance COP.

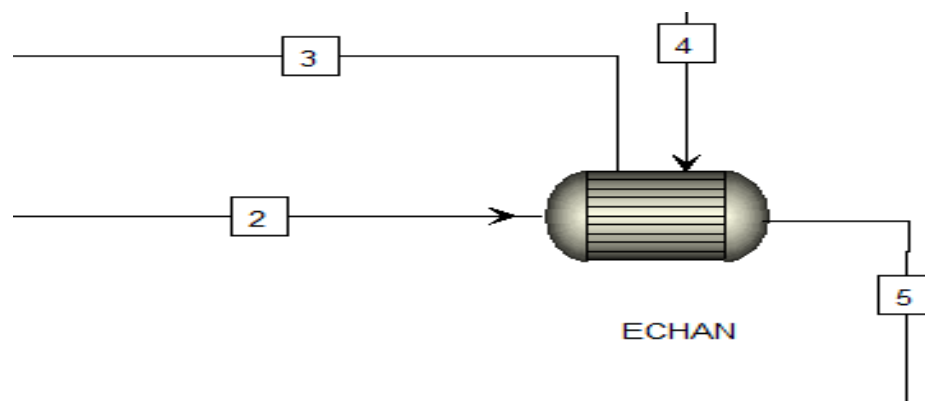
➤ Echangeur de solution :

Point 2 : entrée de la solution riche.

Point 3 : sortie de la solution riche chauffée.

Point 4 : entrée de la solution pauvre.

Point 5 : sortie de la solution pauvre refroidie.



➤ **Figure III.11** : échangeur de chaleur.

➤ Condenseur :

Le type de condenseur utilisé est un condenseur a air.

Point 7 : entrée de fluide réfrigérant à l'état vapeur.

Point 8 : sortie de fluide réfrigérant à l'état liquide.

Point 15 : entrée de l'air à une température 25°C.

Point 16 : sortie de l'air chauffé par la transmission entre les deux fluides.

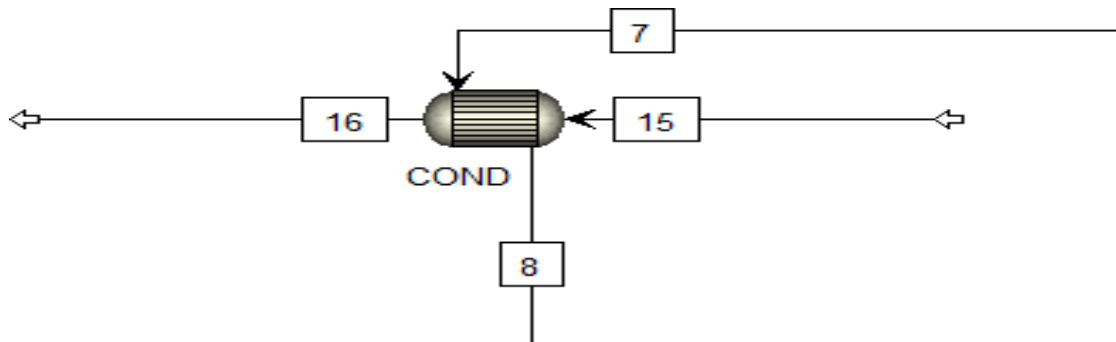


Figure III.12 : condenseur a air.

➤ **Evaporateur :**

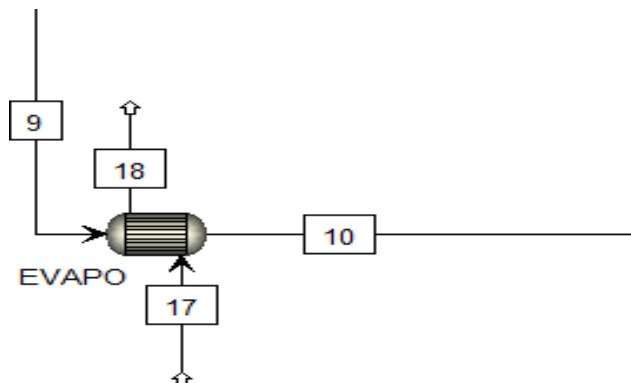


Figure III.13 : Évaporateur avec échangeur de chaleur.

Dans notre simulation, nous avons choisi un évaporateur à eau.

Point 9 : entrée de réfrigérant à l'état vapeur.

Point 10 : sortie de réfrigérant à l'état liquide.

Point 17 : entrée de l'eau à une température 12°C.

Point 18 : sortie de l'eau refroidie par la transmission entre les deux fluides.

➤ **Absorbeur :**

On a ajouté un mixeur pour combiné le bromure de lithium qui revient de générateur et l'eau qui sort de l'évaporateur.

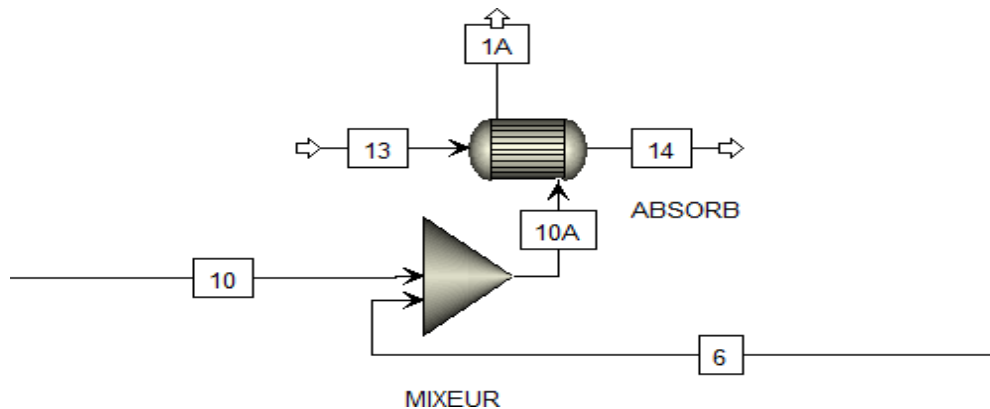


Figure III.14 : Absorbeur avec échangeur de chaleur.

Point 10 : entrée de réfrigérant a l'état liquide.

Point 6 : entrée de l'absorbant refroidie.

Point 10A : sortie de liquide saturé.

Point 13 : entrée de l'air à une température 25°C.

Point 14 : sortie de l'air chauffé par la transmission entre les deux fluides.

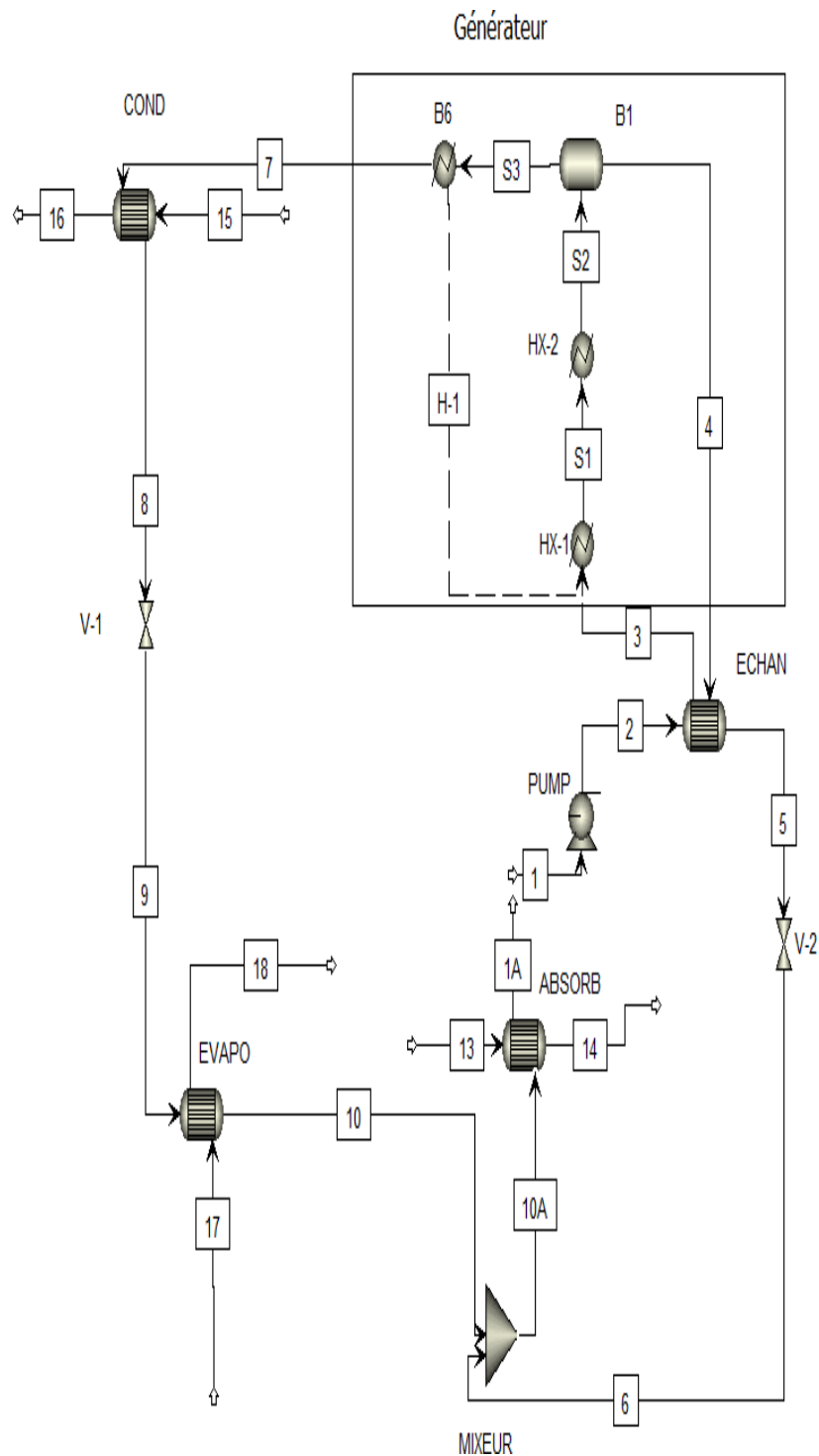
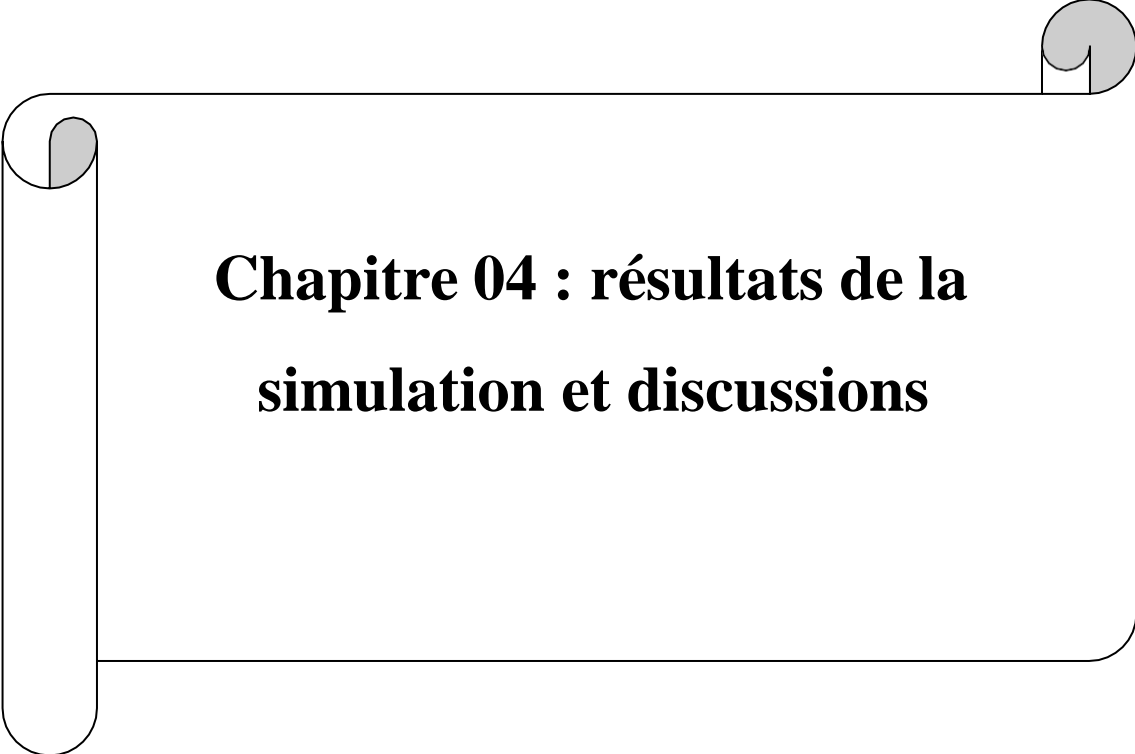


Figure III.15 : modélisation d'un système de réfrigération a absorption (H₂O/LiBr) avec des échangeurs par le logiciel ASPEN PLUS.

III.5. Conclusion :

Ce chapitre présente la simulation du cycle de réfrigération par absorption basé sur le couple $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, réalisée à l'aide du logiciel **Aspen Plus**. Cet outil a permis de reproduire le comportement du système et d'évaluer ses performances thermodynamiques avec précision. Les données issues de cette modélisation seront exposées et analysées dans le chapitre suivant.



Chapitre 04 : résultats de la simulation et discussions

IV. 1. Introduction :

Ce chapitre expose les résultats issus de la simulation d'une machine à absorption à simple effet fonctionnant avec le couple eau/bromure de lithium. Les valeurs numériques générées à l'aide du logiciel **Aspen Plus** sont comparées à celles disponibles dans la littérature, dans le but de vérifier la cohérence, la fiabilité et la pertinence du modèle de simulation élaboré.

IV.2. Validation des résultats :

IV.2.1. Vérification du bilan massique et de la conservation de l'énergie:

Pour vérifier le bilan de masse du modèle à simple effet, il a été nécessaire d'introduire un point d'arrêt dans le cycle afin de pouvoir y réaliser les bilans entrants et sortants. Ce point a été placé sur le flux 1, entre la sortie de l'absorbeur et l'entrée de la pompe, comme illustré aux **figures III.10** et **III.15**. Un modèle bien construit conserve la masse tout au long du cycle, ce qui se traduit par des débits massiques totaux après et avant le point d'arrêt.

Dans notre configuration, le flux quittant l'absorbeur est désigné « 1A » et celui entrant dans la pompe « 1 ». Le Tableau **VI.1** présente les résultats de cette vérification pour le modèle étudié et atteste de la précision du modèle.

Tableau VI.1: Débit massique pour (H₂O/LiBr).

Débit massique (kg/s)	Flux 1	Flux 1A
Total	0.31	0.31
H ₂ O	0.433	0.433
LiBr	0.567	0.567

Une vérification supplémentaire de la conservation de l'énergie a été réalisée pour s'assurer que l'énergie introduite dans le cycle était égale à celle sortante. Les résultats obtenus à partir de modèle Aspen plus pour l'équation **(VI.1)** montre que le bilan énergétique est correctement équilibré pour le système.

$$|Q_{CO} + Q_{AB}| - |Q_{EV} + Q_{GE} + WP| = 0 \quad (\text{VI.1})$$

IV.2.2. Les puissances thermiques et Coefficient de performance :

Les valeurs des puissances thermiques des quatre éléments principaux de la machine à absorption (LiBr/H₂O) à savoir : le générateur, l'absorbeur, le condenseur et l'évaporateur ainsi que le coefficient de performance le COP sont présentées dans le tableau **VI.2**. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus par Liao.X[9]. Dans cette comparaison, l'erreur relative maximale calculée au niveau du condenseur ne dépasse pas 3% ce qui valide notre modèle de simulation.

Tableau VI.2 : Comparaison des performances de la machine entre notre étude et l'étude expérimentale de Liao.X. [9]

Paramètres	Valeurs de Liao.X[13]	Valeurs de la présente étude	Erreur relative (%)
Qabsorbeur (KW)	87.5	86.59	1.04
Qgénérateur (KW)	90.7	90.54	0.17
Qcondenseur (KW)	69.4	71.78	3.42
Qévaporateur (KW)	66.2	67.84	2.47
COP	0.73	0.74	1.36

IV.2.3 Les résultats de simulation de notre cas d'étude :

Le tableau **IV.3** illustre les valeurs numériques des paramètres thermodynamiques tels que : la température, la pression, le débit, fraction de vapeur et la concentration de LiBr générés par le logiciel Aspen Plus dans tous les points de la machine à simple effet. Les numéros correspondent aux différents points d'état illustrés les figures **III.10** et **III.15**.

Ces résultats sont en bon accord avec les résultats issus du modèle numérique EES [9]. Les erreurs relatives de tous les paramètres étudiés sont inférieures à 1 %.

Tableau VI.3 : Résultats de simulation pour le système simple effet.

Point s d'état	de	a	Température(°C)	Pression (kPa)	Fraction de vapeur	Débit massique (kg/s)	Concentration de LiBr(%)
1	Absorbeur	Pompe	33.5	0.758	0	0.31	56.7
2	Pompe	Échangeur de solution	33.5	7.381	0	0.31	56.7
3	Échangeur de solution	Générateur	63.9	7.381	0	0.31	56.7
4	Générateur	Echangeur de solution	89.6	7.381	0	0.28	62.4
5	Echangeur de solution	Détendeur	54.4	7.381	0	0.28	62.4
6	Détendeur	Absorbeur	45.1	0.758	0.01	0.28	62.4
7	Générateur	Condenseur	76.9	7.381	1	0.02	0
8	Condenseur	Détendeur	39.93	7.381	0	0.02	0
9	Détendeur	évaporateur	2.91	0.758	0.06	0.02	0
10	évaporateur	Absorbeur	3.96	0.758	1	0.02	0

IV.3. Les résultats de simulation du système simple effet avec des échangeurs de chaleur :

Dans cette partie, les résultats de simulation de la machine à absorption qui fait intervenir les échangeurs de chaleur : condenseur à air, évaporateur à eau, échangeurs à air dans l'absorbeur comme illustré dans le schéma de processus du système à la figure **III.15** sont présentés.

Tableau VI.4 : Résultats de simulation pour le système simple effet avec des échangeurs de chaleur.

Point s d'état	de	a	Température (C°)	Pression (kPa)	Fraction de vapeur	Débit massique (kg/s)	Concentration de LiBr(%)
1	Absorbeur	Pompe	33.5	0.758	0	0.31	56.7

2	Pompe	Echangeur de solution	33.5	7.381	0	0.31	56.7
3	Echangeur de solution	Générateur	63.9	7.381	0	0.31	56.7
4	Générateur	Echangeur de solution	89.6	7.381	0	0.28	62.4
5	Echangeur de solution	Détendeur	54.4	7.381	0	0.28	62.4
6	Détendeur	Absorbeur	45.1	0.758	0.01	0.28	62.4
7	Générateur	Condenseur	76.9	7.381	1	0.02	0
8	Condenseur	Détendeur	39.93	7.381	0	0.02	0
9	Détendeur	évaporateur	2.91	0.758	0.06	0.02	0
10	évaporateur	Absorbeur	3.96	0.758	1	0.02	0
13	Entrée de l'air	absorbeur	25	-	1	5.68	-
14	absorbeur	Sortie de l'air	40	-	1	5.68	-
15	Entrée de l'air	Condenseur	25	-	1	6.76	-
16	condenseur	Sortie de l'air	35	-	1	6.76	-
17	Entrée de l'eau	évaporateur	12	-	0	3.16	-
18	évaporateur	Sortir de l'air	7	-	0	3.16	-

A noter que des résultats obtenus sont similaires au tableau **VI.3**

IV.3.1. les valeurs (UA) des échangeurs de chaleur :

Le tableau **VI.4** montre les valeurs de UA de chaque échangeur de chaleur utilisé dans le procédé de simulation.

Tableau VI.5 : les valeurs de (UA) de notre étude et les valeurs de Liao.X[9]

Paramètre	(UA) de Liao.X[13]	(UA) de notre étude	Erreur relative (%)
Evaporateur (kW/K)	10.74	11.78	9.68

Générateur (kW/K)	0.95	-	-
Condenseur (kW/K)	7.62	7.76	1.83
Absorbeur (kW/K)	10.97	13.64	24.3
Solution HX	0.80	0.80	0

Nous avons comparé les coefficients UA de nos échangeurs de chaleur à ceux rapportés par Liao.X [9]. Un bon accord a été observé pour tous les échangeurs de chaleur inclus dans le système.

Calculer les coefficients UA présente l'avantage de les intégrer directement comme données d'entrée du modèle, ce qui permet de prédire avec précision les conditions de fonctionnement internes et le coefficient de performance de la machine à absorption, en tenant compte des dimensions réelles des échangeurs de chaleur.

IV.4 Conclusion :

Ce chapitre propose une analyse des résultats obtenus à partir de la simulation du cycle de réfrigération à absorption à simple effet, basé sur le couple eau/bromure de lithium, réalisée à l'aide du logiciel Aspen Plus. Les données issues de cette modélisation montrent une bonne concordance avec celles publiées par Liao X. [9], ce qui atteste de la fiabilité et de la validité du modèle développé.

Conclusion générale :

Cette étude avait pour objectif principal d'explorer en profondeur les systèmes de réfrigération à absorption, en mettant en évidence leur principe de fonctionnement, leurs atouts, leurs limites, ainsi que les méthodes de modélisation et de simulation qui leur sont associées. Les différents chapitres ont permis de développer ces aspects de manière progressive, en apportant une vision globale et structurée de la thématique.

Le dernier chapitre s'est concentré sur l'analyse détaillée des systèmes fonctionnant avec le couple eau/bromure de lithium ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$), reconnus pour leur potentiel en tant que solution énergétique durable dans la production de froid. Bien que prometteurs, ces systèmes doivent encore surmonter certains obstacles, notamment des coûts d'investissement élevés et des performances qui méritent d'être améliorées. La modélisation mathématique s'est avérée essentielle pour approfondir la compréhension du comportement thermodynamique de ces installations et pour en optimiser le fonctionnement.

Dans ce cadre, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel Aspen Plus, facilitant ainsi l'analyse, la validation et l'optimisation du cycle étudié. Cette démarche a permis d'explorer différentes configurations, contribuant à une conception plus rationnelle et plus performante avant toute expérimentation ou application industrielle.

L'interprétation des résultats issus de ces simulations a permis d'évaluer l'efficacité énergétique du système, d'identifier les paramètres influents sur ses performances, et de proposer des pistes d'amélioration concrètes. En définitive, cette recherche confirme la viabilité technique et les bénéfices environnementaux des systèmes à absorption comme alternative crédible aux technologies de réfrigération conventionnelles. L'approche combinant modélisation mathématique et simulation numérique a permis de construire une représentation cohérente et approfondie du système.

Pour encourager une adoption plus large de ces technologies, il est néanmoins crucial de poursuivre les efforts de recherche et développement, afin de lever les barrières actuelles et d'optimiser davantage l'efficacité et la compétitivité des systèmes de réfrigération à absorption.

- [1] H.Pérez-Blanco ,absorption cooling systems using LiBr-H₂O : A review of operating conditions and performance,renewable and sustainable Energy Reviews,vol.16,no.6,pp.4439-4446 (2012).
- [2]SARRA, B. Evaluation Des Performances D'une Machine Frigorifique Hybride A absorption/éjection (Doctoral dissertation, thèse de master, Université Badji Mokhtar Annaba) (2016).
- [3] C. Shein et R. Radermacher. Scroll compressor simulation model. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 123 Pages 217-225(2001).
- [4] Akteriana S, Improving the energy efficiency of traditional multi-stage steam-jet ejector vacuum systems for deodorizing edible oils, 11th International Congress on Engineering and Food, (2011).
- [5] C. A. Dhouib, « Dynamics modelling and simulation of a photovoltaïque réfrigération plant », Renewable Energy, May (2002).
- [6] Castaing-Lasvignottes, J. "Aspects thermodynamiques et technico-économiques des systèmes à absorption liquide."CNAM, Institut Français du froid industriel 51, (2001).
- [7] EE IIT, Kharagpur, India ,(2008).

- [8] Essalhi, N., Fguiri, A., & Marvillet, C. ScienceDirect Design of helical coil condenser of small-capacity Water / Lithium Bromide absorption cooling machine. International Journal of Hydrogen Energy, 42(13), 8888–8897. (2016).
- [9] Liao.X The integration of air-cooled absorption chiller in CHP systems.ph.D. Thesis,University of maryland ,college Park,MD ,USA ;(2004).