

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : Génie Mécanique

Mémoire de Master

pour l'obtention du diplôme de Master en Energétique

**Sur les techniques de refroidissement propres -
Application aux éoliennes**

Hakim HAMIDOUCHE

Sous la direction de M. Arezki SMAILLI, Professeur

Présenté(e) et soutenue publiquement le (28/06/2016)

Composition du Jury :

| | | | |
|--------------|-----------------------|---------------------|-----|
| Président | M. Saïd RECHAK | Professeur, | ENP |
| Promoteur | M. Arezki SMAILLI | Professeur, | ENP |
| Examineurs : | M. Mohamed BEN BRAIKA | Maître assistant A, | ENP |

ENP 2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : Génie Mécanique

Mémoire de Master

pour l'obtention du diplôme de Master en Energétique

**Sur les techniques de refroidissement propres-
Application aux éoliennes**

Hakim HAMIDOUCHE

Sous la direction de M. Arezki SMAILLI, Professeur

Présenté(e) et soutenue publiquement le (28/06/2016)

Composition du Jury :

| | | | |
|--------------|-----------------------|---------------------|-----|
| Président | M. Saïd RECHAK | Professeur, | ENP |
| Promoteur | M. Arezki SMAILLI | Professeur, | ENP |
| Examineurs : | M. Mohamed BEN BRAIKA | Maître assistant A, | ENP |

ملخص:

الهدف النهائي من هذا العمل ينطوي على تقنيات التبريد النظيفة وتطبيق على الهوائيات. في البداية، اقترح القليل من التذكير في بعض التواريخ الرئيسية في تاريخ التبريد وأنظمة التبريد. في الأساس، يتم تقسيم أنظمة الحصول على البرودة إلى عائلتين كبيرتين التي وردت تفاصيل بعض الأمثلة من كل نوع. ومع ذلك، ونظرا لصعوبة السيطرة على ضرورة البرودة، تبين أن يتم استخدام أنظمة التبريد السلبي أقل على الرغم من الجانب الاقتصادي والطاقة الخاصة بها. تحقيقا لهذه الغاية، والانسان اقترح أنظمة تبريد جديدة، تعتمد على تقنيات جديدة للحد من الأثر السلبي لهذه الأنظمة على البيئة.

كلمات المفتاحية:

نظام التبريد السلبي والتبريد النظيف، التبريد التقليدي، التبريد الحديث

Abstract

The ultimate goal of this work involves clean cooling techniques and an application to wind turbines. Initially, it was proposed to carry out a few reminders on some key dates in the history of the cold and refrigeration. Essentially, the cold getting systems are split into two large families which we have studied in details. However, given the difficulty of controlling the need for cold, it was found that passive cooling systems are used less despite their clean and economic energy aspect. For this purpose, man has proposed new cooling systems, based on new technologies to minimize the negative impact of these refrigeration systems on the environment.

Keywords:

Passive cooling systems, Clean refrigeration, Conventional refrigeration, Innovative cooling systems

Résumé

L'objectif ultime du présent travail porte sur les techniques de refroidissement propres ainsi que leur application aux éoliennes. Dans un premier temps, on s'est proposé d'effectuer quelques rappels sur certaines dates clés de l'histoire du froid et de la réfrigération. Essentiellement, les systèmes d'obtention du froid sont décomposés en deux grandes familles dont on a détaillé quelques exemples de chacune d'elles. Cependant, vu la difficulté de contrôler le besoin en froid, il a été constaté que les systèmes de refroidissement passifs sont moins utilisés malgré leur aspect énergétique propre et économique. A cet effet, l'Homme s'est proposé de nouveaux systèmes de refroidissement, basé sur les nouvelles technologies afin de réduire au maximum l'impact négatif de ces systèmes de réfrigération sur l'environnement.

Mots clés :

Système de refroidissement passif, Réfrigération propre, Réfrigération conventionnelle
Systèmes innovants

Dédicace

Je dédie ce modeste travail ;

- ✓ À mes chers parents à qui je dois tout. Que Dieu les bénisse !
- ✓ À tous mes aimables sœurs et frères.
- ✓ À toute ma grande famille
- ✓ À toute la promotion 2016 de Génie Mécanique.
- ✓ À tous mes amis

Remerciement

Louange à Allah, Dieu Unique, que Sa paix et Sa bénédiction soient sur le dernier des prophètes, Muhammad, sur sa famille et sur tous ses compagnons.

Je tiens à remercier mon enseignant et promoteur, Monsieur A. SMAILLI, Professeur à l'ENP, pour sa disponibilité, son aide, ainsi que pour toutes les réponses qu'il a su me donner quand je rencontrais des soucis, et je lui suis gré de son soutien et ses précieux conseils.

Je remercie le président du jury, Monsieur S. RECHAK, Professeur à l'ENP, ainsi que l'examineur Monsieur M. BEN BRAIKA, Maître assistant A à l'ENP, d'avoir accepté d'évaluer mon modeste travail.

J'en suis très reconnaissant à tous les enseignants et les professeurs ayant contribué à ma formation tout au long de mon cursus.

Table des matières

| | |
|--|----|
| Résumé | |
| Dédicace | |
| Remerciement | |
| Table des matières | |
| Liste des tableaux | |
| Tables des figures | |
| Liste des abréviations | |
| Introduction..... | 10 |
| Chapitre 1 Histoire du froid et de la réfrigération | 12 |
| 1.1. Historique de la thermodynamique : | 12 |
| 1.2. Histoire des systèmes mécano-frigorifique :..... | 13 |
| 1.2.1. Cycles à compression de vapeur :..... | 13 |
| 1.2.2. Systèmes utilisant des cycles à gaz :..... | 13 |
| 1.2.3. Systèmes thermoélectriques :..... | 13 |
| 1.2.4. Réfrigération magnétique : | 14 |
| 1.3. L'histoire des systèmes thermo-frigorifiques :..... | 14 |
| 1.3.1. Systèmes frigorifiques à la sorption :..... | 14 |
| 1.3.1.1. Système à absorption :..... | 14 |
| 1.3.1.2. Systèmes frigorifiques à adsorption et thermochimiques :..... | 14 |
| 1.3.2. Système frigorifique à éjection :..... | 14 |
| Chapitre 2 Production du froid par les systèmes passifs | 16 |
| 2.1. Tour de refroidissement : | 16 |
| 2.1.1. Tours ouvertes :..... | 17 |
| 2.1.2. Tours fermées :..... | 17 |
| 2.1.3. Tours hybrides :..... | 17 |
| 2.1.4. Tours de refroidissement à tirage naturel :..... | 18 |
| 2.2. Tour à vent :..... | 18 |
| 2.3. Refroidissement par la géothermie :..... | 19 |
| 2.3.1. Echangeur Sol-Air par un ventilateur :..... | 20 |
| 2.3.2. Echangeur Sol-Air assisté par une tour à vent :..... | 21 |
| Chapitre 3 Production du froid par les systèmes actifs | 23 |
| 3.1. Les systèmes mécano-frigorifiques :..... | 23 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| 3.1.1. Cycles à compression de vapeur : | 23 |
| 3.1.2. Réfrigération magnétique : | 25 |
| 3.1.3. Systèmes thermoélectriques : | 29 |
| 3.2. Systèmes thermo-frigorifiques : | 32 |
| 3.2.1. Réfrigération à sorption : | 32 |
| 3.2.1.1. Réfrigération à adsorption : | 32 |
| 3.2.2. Réfrigérateur à absorption : | 34 |
| 3.2.3. Réfrigération avec éjecteur : | 37 |
| 3.2.3.1. Cycle de puissance : | 38 |
| 3.2.3.2. Cycle de réfrigération : | 38 |
| 3.2.3.3. Influence des conditions opératoires : | 38 |
| Chapitre 4 Application aux éoliennes | 40 |
| 4.1. Cycle de réfrigération à compression de vapeur : | 40 |
| 4.2. Refroidissement centralisé : | 41 |
| 4.3. Réfrigération par jet de vapeur à énergie solaire : | 42 |
| 4.4. Le refroidissement par caloducs pour le multiplicateur de vitesse : | 45 |
| 4.5. Utilisation de la réfrigération magnétique dans une nacelle d'éolienne : | 46 |
| Conclusion : | 47 |
| Bibliographie..... | 48 |

Liste des tableaux

Tableau 3-1. Comparatif des avantages et inconvénients entre les deux systèmes de sorption [26].... 37

Tables des figures

| | |
|--|----|
| Figure 2-1. Tour de refroidissement ouverte [5]..... | 17 |
| Figure 2-2. Les tours de refroidissement fermées [5] | 17 |
| Figure 2-3. Distribution de température d'air sec dans NDWCT à une vitesse d'air croisé de ; a) 0m/s b) 10m/s [4] | 18 |
| Figure 2-4. Schéma d'une tour à vent pour refroidissement [31] | 19 |
| Figure 2-5. Résultats de simulation par fluent des tours à vent de différentes configurations [7] | 20 |
| Figure 2-6. Schéma du système EAHE avec ventilation [10] | 21 |
| Figure 2-7. Schéma du système de refroidissement EAHE avec une tour à vent [11]..... | 22 |
| Figure 3-1. Schéma de principe d'un cycle frigorifique idéal opérant réversiblement suivant le cycle de Carnot. | 24 |
| Figure 3-2. Cycle pratique sans pertes | 25 |
| Figure 3-3. Schéma de principe de l'AMRR, le matériau EMC géant est ici le Gadolinium et le fluide caloporteur est de l'eau [34]..... | 26 |
| Figure 3-4. Dispositif de réfrigération magnétique développé par Zimm et al [16] | 27 |
| Figure 3-5. Analogie entre le cycle compression-détente traditionnel et le cycle de réfrigération magnétique [32] | 27 |
| Figure 3-6. Profil de température associé à l'AMRR [35] | 28 |
| Figure 3-7. Cycle élémentaire de Brayton pour un matériau avec une transition de phase de premier ordre [33]..... | 28 |
| Figure 3-8. Schématisation du principe de refroidissement par effet de Peltier | 29 |
| Figure 3-9. Comparaison entre le cycle de réfrigération thermoélectrique et celui de la réfrigération à compression de vapeur [36] | 30 |
| Figure 3-10. Schéma de principe d'une machine à adsorption [24]..... | 33 |
| Figure 3-11. Machine de réfrigération à adsorption [37]..... | 34 |
| Figure 3-12. Structure d'une machine frigorifique à absorption H ₂ O/LiBr [24]..... | 35 |
| Figure 3-13. Représentation du cycle à absorption sur un diagramme d'Oldham, couple H ₂ O/LiBr [24] | 36 |
| Figure 3-14. Système de réfrigération à éjecteur | 38 |
| Figure 3-15. Coupe d'un éjecteur et évolution des vitesses et des pressions | 39 |
| Figure 4-1 : Schéma structurel de la turbine éolienne adoptant un cycle de refroidissement à vapeur [12] | 40 |
| Figure 4-2 : Schéma du système de refroidissement centralisé des éoliennes [12]..... | 41 |
| Figure 4-3 : Structure de système de refroidissement centralisé dans la nacelle des éoliennes [12] | 42 |
| Figure 4-4 : Schéma du système de réfrigération par jet de vapeur à énergie solaire pour les éoliennes [12] | 43 |
| Figure 4-5.Système de réfrigération par jet [12]..... | 45 |
| Figure 4-6 : Le schéma d'une éolienne adoptant un refroidissement à caloduc pour le multiplicateur [12] | 45 |
| Figure 4-7 : schéma descriptif du caloduc [12] | 46 |

Liste des abréviations

EAHE : « Earth to air heat exchanger » Echangeur de chaleur Sol-Air

GSHP : « Ground Source Heat Pump » Pompe à chaleur géothermique

TAL : Tour Aéro-Réfrigérante / Tour de refroidissement

NDWCT : « Natural Draft Wet Cooling Towers » Tours de refroidissement humide à tirage naturel

HP : Haute pression

BP : Basse pression

PRG : Potentiel de réchauffement global

CFC : chlorofluorocarbone

HCFC : hydro-chloro-fluoro-carbure

Introduction

L'Homme depuis les temps anciens, son solennel but est d'améliorer sa vie en cherchant du confort, tout en économisant du temps et de l'énergie. Ainsi, comme l'homme primaire utilise toute son énergie pour s'assurer la nourriture, ses disciples d'après ont besoin de conserver et de stocker ces denrées pour leurs journées d'avenir. L'Homme des pays tempérés s'est rapidement rendu compte que les denrées périssables pouvaient être conservées dans de bien meilleures conditions l'hiver que l'été. Ainsi, aux premiers siècles de l'histoire, tel qu'il est mentionné dans les livres anciens, que les Chinois furent les premiers à s'apercevoir que la glace était susceptible de refroidir leurs boissons en les rendant plus savoureuses.

Alors, l'utilisation du froid naturel s'est faite très tôt et aussi pour très longtemps. Tel qu'au 5ème siècle avant J-C, le grec Protagoras rapportait que les Egyptiens produisaient de la glace dans des récipients plats placés sur le toit des maisons. Puis, le premier à avoir évoqué l'usage des mélanges réfrigèrent, en Inde, au 4ème siècle, semble être l'écrivain arabe Ibn Abi Usaibia. Cependant, l'usage du froid naturel est très limité avec les progrès scientifiques et technologiques de l'époque dernière. D'où la nécessité de faire tourner la pensée humaine vers la réfrigération artificielle.

« La chaleur ne peut passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud » C'est l'énoncé de Clausius du second principe de la thermodynamique. Si l'on veut effectuer le transfert de chaleur, dans le sens antinaturel, d'un milieu froid vers un milieu chaud, il faut, nécessairement, d'une part, imaginer et mettre en œuvre un système thermique particulier, et, d'autre part, fournir de l'énergie au système.

Ainsi, la réfrigération est le procédé permettant d'obtenir et de maintenir un système quelconque à une température inférieure à celle de son environnement extérieur. On distingue deux manières d'obtention du froid ; le refroidissement passif en utilisant une source naturelle du froid tel que la géothermie, ou bien la réfrigération active en produisant du froid par des procédés industriels tel que les machines mécano-frigorifiques et thermo-frigorifiques.

Les machines mécano-frigorifiques sont des systèmes de réfrigération utilisant de l'énergie de haut grade i.e. un travail mécanique ou électrique afin de produire du froid. On abordera dans ce mémoire : les appareils conventionnels à compression de vapeurs, les systèmes utilisant des cycles à gaz de réfrigération, les systèmes thermoélectriques ainsi que les réfrigérateurs magnétiques.

Les appareils thermo-frigorifiques sont des systèmes de production de froid en utilisant de l'énergie thermique (l'énergie de bas grade) pour actionner le cycle de réfrigération. Alors, les cycles frigorifiques à absorption ou à adsorption ainsi que les systèmes frigorifiques à éjection sont aussi traités dans ce travail.

Pa conséquent, ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier fait un rappel sur l'historique de la réfrigération. Puis le deuxième, met en évidence les mécanismes de production du froid par les méthodes passives. Ensuite, le troisième présente les systèmes de réfrigération active. Enfin, le dernier chapitre expose les nouveaux préceptes de réfrigération proposés à l'application au domaine de refroidissement des éoliennes.

Chapitre 1

Histoire du froid et de la réfrigération

Avant les machines frigorifiques, l'Homme utilisait déjà du froid naturel. Les Chinois furent les premiers à utiliser la glace pour refroidir leurs boissons. Un peu plus tard les Romains et les Grecs utilisaient des esclaves pour transporter de la glace depuis les sommets des montagnes. Cette glace était conservée jusqu'à son utilisation dans des silos aux parois recouvertes de paille. Pareille pour les Mésopotamiens, qui se servaient de ces fosses pour conserver de la viande.

Petit à petit cette pratique était courante dans toute l'Europe à partir du XVII^{ème} siècle. Et en France la glace et la neige était couramment utilisées pour refroidir les boissons, puis vers 1612, Francis Bacon fut le premier à utiliser de la neige pour conserver des denrées alimentaires.

L'utilisation du froid naturel s'est faite très tôt et aussi pour très longtemps puisqu'au début du XX^{ème} siècle le marché de la glace naturelle était encore plus important que celui de la glace artificielle. La glace produite naturellement, sans machines, était :

- ✓ Soit issue, de façon permanente, de régions froides et transportée sur de longues distances.
- ✓ Soit issue, de manière discontinue, des pièces d'eau des régions tempérées gelées par le froid hivernal. Il était nécessaire de conserver cette glace dans des édifices particuliers les glaciers dont les parois devaient être thermiquement isolantes.
- ✓ Soit produite, toujours de manière naturelle, mais à l'instigation de l'homme, quand cela était possible. Ainsi, dans les pays au ciel très clair, on a pu produire de la glace dans des bassins largement ouverts vers le ciel. Le rayonnement thermique de l'eau permettait, dans certaines conditions atmosphériques, un refroidissement suffisant pour former de la glace. Au 5^{ème} siècle avant J-C, le grec Protagoras rapportait que les Egyptiens produisaient ainsi de la glace dans des récipients plats placés sur les toits de leurs maisons.

On s'est avisé, sans doute fortuitement, que le mélange de certains sels dans l'eau abaissait notablement la température de la solution ainsi obtenue. Le premier à avoir évoqué l'usage, en Inde, au IV^{ème} siècle, de tels mélanges semble être l'écrivain arabe Ibn Abi Usaibia.

1.1. Historique de la thermodynamique :

Dès le XVII^{ème} siècle, la chaleur et le froid alimentèrent les réflexions des savants et philosophes comme Robert Boyle en Angleterre et Mikhaïl Lomonossov en Russie. Dans la même période, après les premiers travaux de Galilée, de très nombreuses études furent entreprises sur la thermométrie où s'illustrèrent Guillaume Amontons en France, Isaac Newton en Angleterre, Daniel Fahrenheit en Allemagne, René de Réaumur en France et enfin Anders Celsius qui créa, en 1742, en Suède, l'échelle thermométrique centésimale.

Au XVIII^{ème} siècle, William Cullen observa que l'évaporation de l'éther éthylique en abaisse la température. Son disciple et successeur, l'écossais Joseph Black, établit bien la

différence entre chaleur et température, et peut être considéré comme le fondateur de la calorimétrie.

Après les travaux de l'écossais James Watt sur la machine à vapeur, les études des physiciens sur les gaz sont plus développées. Ainsi, après les expériences de l'américain Benjamin Thomson, la Thermodynamique pouvait entrer en scène. C'est le français Sadi Carnot qui ouvrit le rideau, en 1824, avec son célèbre mémoire qui jetait les bases du second principe de la Thermodynamique.

Au cours du XIX^{ème} siècle, tandis que s'amorçaient les études sur les divers systèmes frigorifiques, la Thermodynamique se construisit rapidement avec les travaux de James Prescott Joule en Angleterre, Rudolph Clausius en Allemagne, Ludwig Boltzmann en Autriche et William Thomson (Lord Kelvin) en Angleterre. D'autres physiciens prestigieux contribuèrent à l'extension de la Thermodynamique au cours du XX^{ème} siècle.

1.2. Histoire des systèmes mécano-frigorifiques :

1.2.1. Cycles à compression de vapeur :

Une première description du cycle a été donnée en 1805 par l'américain Oliver Evans. Mais c'est à l'américain Jacob Perkins, qui travaillait en Angleterre que nous devons le premier brevet. Et un premier modèle fonctionnant à l'éther éthylique en 1835. Les premières machines à compression qui eurent un succès industriel sont le fait d'un écossais émigré en Australie, James Harrison (brevets en 1855-56-57). Les machines étaient fabriquées en Angleterre, elles pouvaient produire de la glace ou refroidir des saumures. Le frigorigène était toujours l'éther éthylique.

1.2.2. Systèmes utilisant des cycles à gaz :

La première machine à air, à cycle ouvert, est due à l'américain John Gorrie pour refroidir de la saumure à -7°C (brevets 1850-51). S'inspirant du moteur à air chaud du pasteur Robert Stirling (1837), l'écossais Alexander Kirk réalisa une machine à cycle fermé qui produisit régulièrement, pendant une dizaine d'année, à partir de 1864, une température de -13°C .

1.2.3. Systèmes thermoélectriques :

En 1821, le physicien allemand Thomas Johann Seebeck découvre un effet thermoélectrique. Il remarqua qu'une aiguille métallique est déviée lorsqu'elle est placée entre deux conducteurs de natures différentes liés par des jonctions à leurs extrémités et soumis à un gradient thermique (effet Seebeck). Il interprète ses observations en postulant un lien entre champ magnétique et différence de température entre les deux jonctions. En réalité, l'effet observé est d'origine électrique : une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température. L'utilisation la plus connue de l'effet Seebeck est la mesure de température à l'aide de thermocouples.

En 1834, un horloger et inventeur français installé à Genève, Jean Peltier, découvre le second effet thermoélectrique : une différence de température apparaît aux jonctions de deux matériaux de natures différentes soumis à un courant électrique (effet Peltier).

1.2.4. Réfrigération magnétique :

L'étude de la réfrigération magnétique a débuté avec la découverte de l'effet magnéto-calorique (EMC). Otto Warburg en 1881 observa le premier EMC en étudiant la variation de la température dans le fer lors de l'application d'un champ magnétique [1]. Edison et Tesla, respectivement en 1887 et 1890, ont présenté chacun un générateur électrique basé sur l'effet thermomagnétique utilisant des matériaux dont l'aimantation dépend fortement de la température. La première démonstration expérimentale importante de la réfrigération magnétique a été réalisée par W.F. Giauque qui en 1933, a pu descendre sous la température de 1K. En 1954 Heer, Barnes et Daunt ont construit un réfrigérateur magnétique qui fonctionne en continu et qui produit 7 μ W à 0.26 K [1].

1.3. L'histoire des systèmes thermo-frigorifiques :

1.3.1. Systèmes frigorifiques à la sorption :

1.3.1.1. *Système à absorption :*

Le père de ces systèmes est le français Ferdinand Carré qui breveta en 1859 la première machine à absorption continue utilisant le couple frigorigène : ammoniac-eau. Ces machines furent presque immédiatement opérationnelles. Leur étude thermodynamique ne débuta qu'en 1913 avec l'allemand Edmund Altenkirch et se poursuivit durant la première moitié du XX^{ème} siècle. Il faut aussi citer les travaux de l'italien Guido Maïuri sur ces machines et ceux des suédois von Platen et Munters sur le cycle à absorption-diffusion pour les réfrigérateurs à absorption sans pompe (1920). Les années 1940 ont vu apparaître, aux Etats-Unis, la machine à absorption eau-bromure de lithium, où l'eau est le frigorigène ; cette adaptation du cycle de Carré est depuis largement utilisée en climatisation.

1.3.1.2. *Systèmes frigorifiques à adsorption et thermochimiques :*

Ils apparurent plus tardivement, essentiellement dans la première moitié du XX^{ème} siècle. Les travaux concernant ce domaine sont moins par rapport à d'autres types de réfrigération. Le nombre d'articles publiés chaque 30 ans, jusqu'à 2008 par le service d'information universitaire en ligne « International Web of Science » montre qu'il n'y a pas de travail effectué avant 1978, cependant ceci n'est pas le cas [2]. L'histoire de l'adsorption est long, débuté par Faraday (1823). Il a utilisé l'adsorption de grandes quantités d'ammoniac dans du chlorure d'argent en tant que base d'un compresseur thermique afin d'obtenir et d'étudier l'ammoniac liquide. Puis, au début des années 1900, nous voyons des brevets tels que celui de Dunsford (1915) pour les réacteurs d'adsorption d'ammoniac à l'aide de nitrate d'ammonium comme adsorbant, en particulier pour une utilisation dans des applications marines. En 1925, la paire de gel de sulfure dioxyde de la silice a été utilisée pour le conditionnement d'air des wagons de chemin de fer aux États-Unis, tel que rapporté par Hulse (1929) et brevetée par Miller (1929).

1.3.2. Système frigorifique à éjection :

En 1838, le Français Pelletan a obtenu un brevet pour la compression de la vapeur au moyen d'un jet de vapeur. Puis, par la même technique, vers 1900, l'Anglais Charles Parsons a étudié

la possibilité de réduction de la pression par un effet d'entraînement. Ainsi, c'est avec l'eau que le système frigorifique à éjection entra en scène en 1908, bien qu'il puisse être utilisé avec d'autres frigorigènes. La paternité en revient au français Maurice Leblanc qui a développé le système vers 1907. Dans ce système, les éjecteurs ont été utilisés pour produire un jet de vapeur à une vitesse d'environ 1200m/s. Et les premières machines désignées Leblanc sont vendues vers 1909 à Paris.

Chapitre 2

Production du froid par les systèmes passifs

Ces méthodes de production du froid sont les plus anciennes parmi d'autres moyens de réfrigération. L'Homme utilisait des sources naturelles afin de subvenir à son besoin en froid. De ce fait, ces systèmes sont considérés les plus cleans et les plus protecteurs de l'environnement et de l'écosystème. Comme on vient de le voir dans le chapitre 2, l'usage de la glace naturelle et de la neige furent les premiers pas de l'humanité dans l'utilisation du froid.

Les systèmes de conditionnement d'air sont responsables de la moitié d'énergie consommée dans les locaux [3]. Par conséquent, afin de maintenir un environnement confortable au sein des édifices, l'utilisation des systèmes passifs peut réduire énormément la facture de consommation d'énergie ainsi que la demande en conditionnement d'air.

2.1. Tour de refroidissement :

Les tours aéro-réfrigérantes (TAR), aussi appelées tours de refroidissement, sont utilisées pour refroidir un liquide à l'aide d'un gaz, généralement de l'eau avec l'air ambiant. Il s'agit d'un cas particulier d'un échangeur de chaleur où le transfert thermique s'effectue par contact direct ou indirect entre les deux flux. Les tours de refroidissement sont des équipements courants, présents dans des installations de climatisation, ou dans des procédés industriels et énergétiques.

Les tours aéro-réfrigérantes se basent sur le principe de refroidissement évaporatif, ou par voie humide. Ce procédé est basé sur le contact direct entre l'air et l'eau à refroidir. L'air, avide d'humidité, évapore une partie de l'eau en prélevant la chaleur latente de vaporisation. Ainsi, cette dernière constitue la majeure partie de l'échange thermique qui est complété par des échanges par convection entre l'eau et l'air. Par conséquent, l'efficacité de l'échange de la TAR est conditionnée par la différence entre la température d'eau froide et celle du bulbe humide de l'air [4].

La température au bulbe humide de l'air pénétrant dans la tour de refroidissement conditionne la quantité d'eau évaporée et donc la quantité de chaleur transférée à l'air. Généralement, cette quantité d'eau évaporée est de 1 % pour un écart thermique de 6 K. Cette température de bulbe humide est bien plus basse que la température de bulbe sec de l'air (environ une température au bulbe humide de 20°C en été, pour une température sèche de 32°C). En outre, le transfert de chaleur latente de vaporisation permet de transférer plus de chaleur par volume d'air traversant le corps d'échange, comparativement au transfert de chaleur sensible. Pour ces raisons, les tours de refroidissement permettent d'atteindre des températures de sortie d'eau plus basses que la température de l'air ambiant avec un débit d'air relativement faible (jusqu'à 25°C pour une température extérieure de 32°C et 40% d'humidité relative).

Il existe trois types de tours de refroidissement ; les tours ouvertes, les tours fermées et les tours hybrides.

2.1.1. Tours ouvertes :

C'est l'eau du circuit qui est directement pulvérisée et en partie évaporé dans la tour de refroidissement. C'est le système le plus efficace qui entraîne le refroidissement le plus élevé. Mais le contact entre l'eau et l'atmosphère est une source de corrosion (oxygénation de l'eau), plus au risque d'introduction de poussières et de grains de sable et de se mélanger avec l'eau du circuit.

Et on peut voir sur la *Figure 2-1*, que l'eau à refroidir ressort à une température inférieure à la température d'entrée d'air. Ainsi, que la température de sortie de l'air est la plus basse dans tout le système.

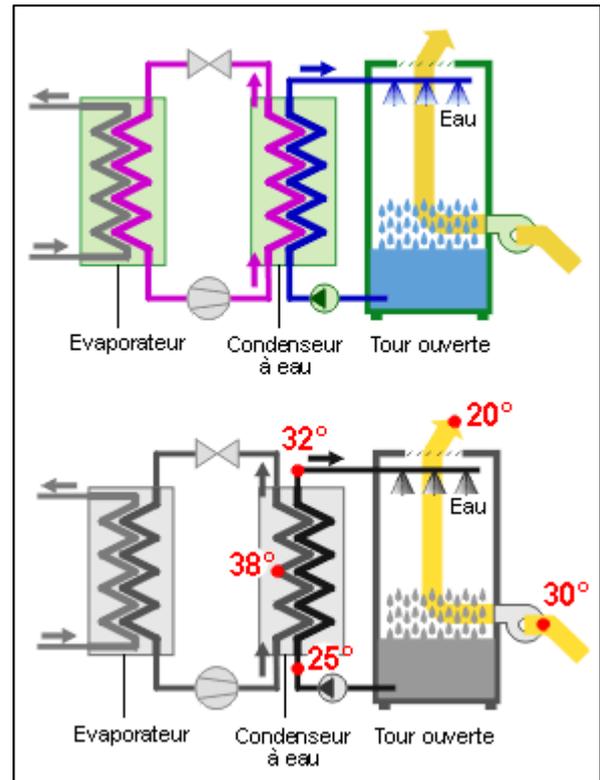


Figure 2-1. Tour de refroidissement ouverte [5]

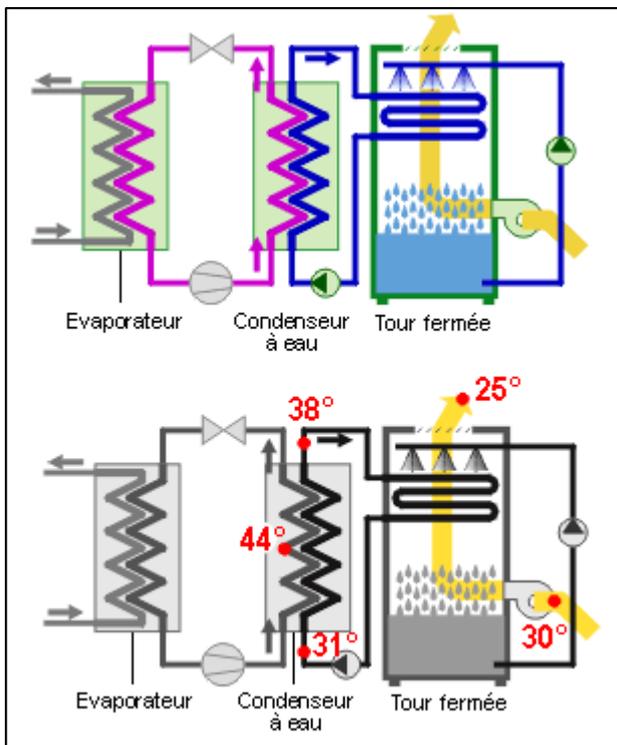


Figure 2-2. Les tours de refroidissement fermées [5]

2.1.2. Tours fermées :

On parle de tour "fermée" si l'eau du circuit de refroidissement circule dans un échangeur fermé sur lequel de l'air extérieur est pulsé, et de l'eau est pulvérisée. L'évaporation partielle de l'eau entraîne un refroidissement plus faible que dans le cas de la tour ouverte, mais les risques de corrosion sont annulés.

Et on peut voir sur la *Figure 2-2*. Les tours de refroidissement fermées *Figure 2-2* que même si la température de sortie d'air est inférieure à celle de son entrée, une température de sortie de l'eau est relativement élevée par rapport à celle de la tour ouverte.

2.1.3. Tours hybrides :

Les installations de refroidissement équipées de tours de refroidissement hybrides combinent à la fois un échange sec et un échange humide. L'échange sec est assuré par une batterie à ailettes, appelée également « batterie anti-panache » ou « désurchauffeur ». Cet échangeur est placé au sommet de la tour de refroidissement. L'échange thermique est réalisé par convection et conduction. Le désurchauffeur assure la suppression du panache visuel.

Les performances obtenues avec ce type de tours hybrides sont équivalentes à celles fournies par une tour ouverte, c'est-à-dire qu'il est possible d'atteindre des températures minimales de fluide refroidi à la sortie de la tour de l'ordre de 25°C. Ces performances ne sont possibles que dans le cas surdimensionné de la tour de refroidissement (taille et augmentation significative du débit d'air). La température du fluide refroidi peut être comprise entre 25 et 50°C, et les puissances thermiques évacuées varient de quelques centaines de kW à plusieurs MW.

2.1.4. Tours de refroidissement à tirage naturel :

Le travail de R. Al-Waked [4] a montré l'effet des murs brise-vent sur la performance thermique des tours de refroidissement humides à tirage naturel (NDWCT) sous le vent croisé. Une étude numérique avec un modèle CFD à trois dimensions a été utilisé pour quantifier les effets d'emplacement de la tour et de la porosité de la paroi sur la performance thermique du NDWCT. Les résultats ont démontré que l'installation de parois imperméables solides dans la zone de pulvérisation se traduit par la dégradation de la performance du NDWCT. Toutefois, l'installation des murs solides à l'entrée de l'NDWCT a amélioré sa performance à toutes les vitesses de vent. De même, l'installation de parois ayant une faible porosité a montré une amélioration dans la performance de l'NDWCT. Une réduction de 0,5-1 K de la température de l'eau de refroidissement provenant de la tour vers le condenseur a été atteinte à toutes les vitesses de vent en installant des parois poreuses à l'intérieur et à l'extérieur de la zone de pulvérisation.

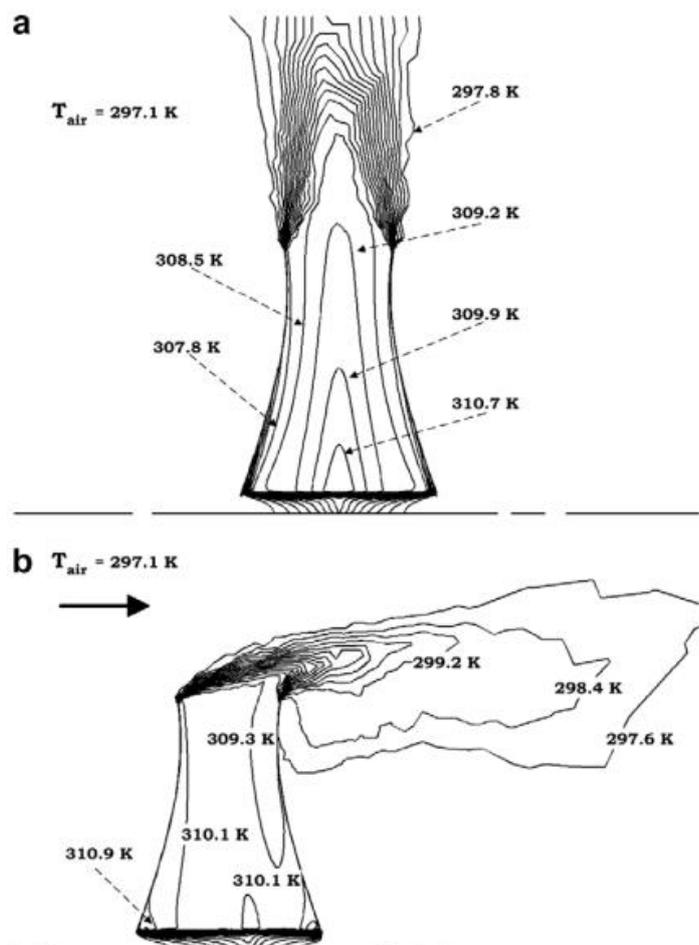


Figure 2-3. Distribution de température d'air sec dans NDWCT à une vitesse d'air croisé de ; a) 0m/s b) 10m/s [4]

2.2. Tour à vent :

Les tours à vent ont été utilisées traditionnellement comme solution climatique passive dans les pays du Moyen-Orient. Ce sont des structures massives qui capturent le flux principal de vent local afin de forcer l'air frais de circuler à l'intérieur du bâtiment et promouvoir le confort thermique des occupants. l'entrée de la tour est construite d'une manière à être face à la

direction du vent, et les sorties sont réalisées dans le sens du vent afin de créer une différence de pression qui circulera l'air dans le système.

Cet ouvrage d'A. Badran [6] a comme objectif, la démonstration de la faisabilité d'un tel concept de refroidissement. Il est techniquement possible pour produire le confort thermique

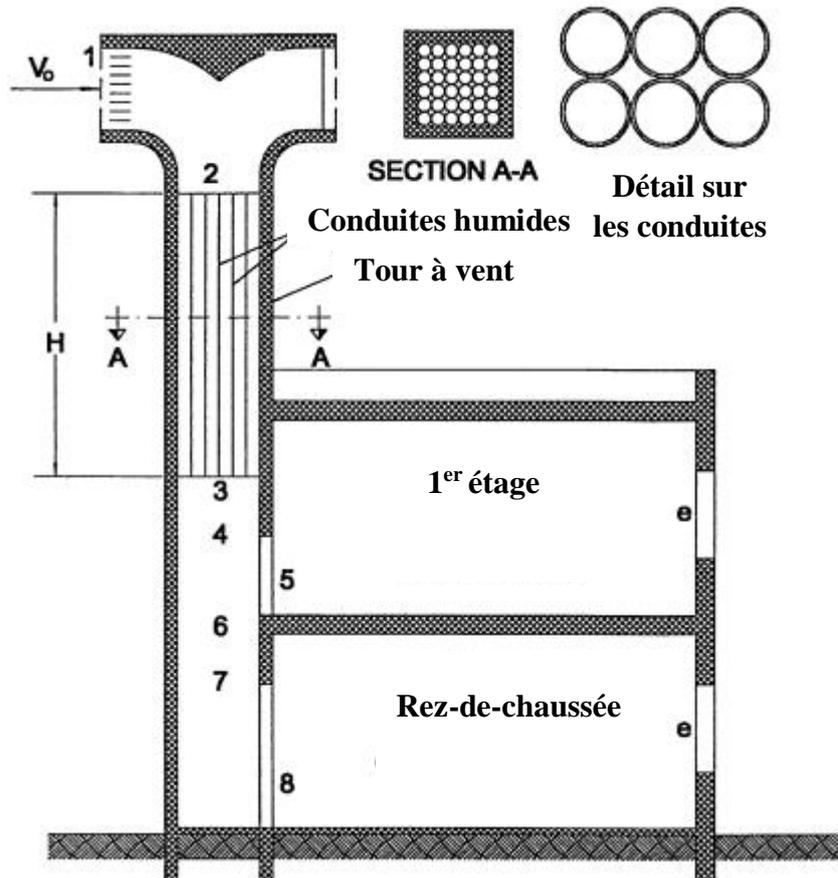


Figure 2-4. Schéma d'une tour à vent pour refroidissement [31]

dans les maisons populaires construites dans des conditions climatiques arides et semi-arides dans le nord du Mexique.

L'étude réalisée par F.Z. Sierra-Espinosa [7] est basée sur des simulations numériques, réalisées avec la méthode RANS sur un programme commercial Fluent. Simulations de solutions couplées conjuguées entre flux d'air et la conduction de chaleur à travers le plafond, le plancher et les murs ont été réalisées dans un état stable et régime turbulent avec des conditions aux limites appropriées. L'analyse des résultats a porté sur la circulation du flux d'air à l'intérieur du bâtiment principal de choisir la meilleure configuration, qui a été testée par la distribution de flux conjugué et le transfert de chaleur dans les bâtiments (Figure 2-5).

Il reste à souligner que la tour à vent est une méthode de refroidissement passif qui permet d'économiser l'électricité, vu qu'elle remplace les systèmes de ventilation électrique.

2.3. Refroidissement par la géothermie :

La température du sol à une profondeur de 2 à 3 m est presque constante tout au long de l'année [8]. Et cette température est supérieure à la température extérieure durant les saisons

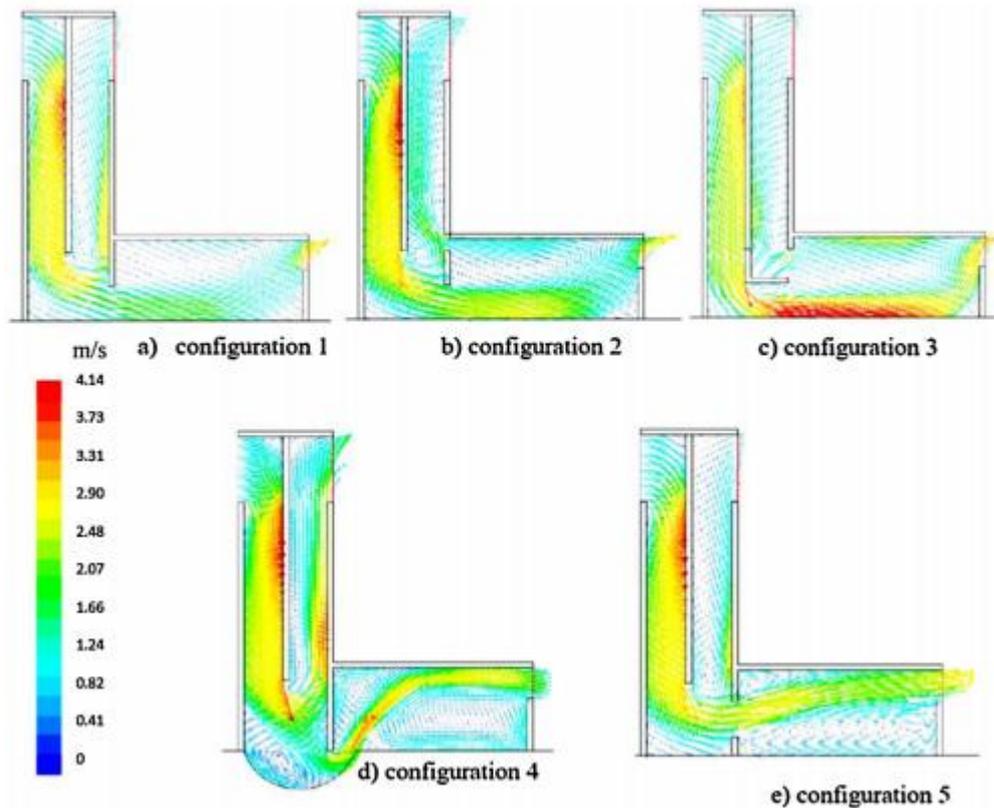


Figure 2-5. Résultats de simulation par fluide des tours à vent de différentes configurations [7]

froides et inférieure à la température extérieure au cours des saisons chaudes. Par conséquent, cette réserve naturelle, de chaleur pour le chauffage en hiver et du froid pour le refroidissement en été, conduit les chercheurs à penser comment investir dans les technologies qui exploitent cette source.

Les technologies existantes qui utilisent le sol comme source de chaleur ou du froid, peuvent être classées selon deux catégories, les pompes à chaleur géothermiques (GSHP) et les refroidisseurs passifs utilisant les échangeurs sol-air (EAHE). Dans ce chapitre on parlera sur les systèmes de refroidissement géothermiques passifs.

2.3.1. Echangeur Sol-Air par un ventilateur :

Le EAHE (Earth to Air Heat Exchanger) ou bien l'échangeur de chaleur Sol-Air est un système de refroidissement géothermique qui consiste en un tuyau ou d'un réseau de tuyauterie enterrés à une profondeur raisonnable en dessous de la surface du sol [9]. La ventilation assure l'alimentation du système par l'air ambiant. Ainsi, la différence de température entre la surface du tube et l'air entraîne son chauffage ou bien son refroidissement. Par conséquent, l'échange de chaleur entre l'air et le tuyau dépend de plusieurs facteurs qui sont ; la température du sol, la température de l'air ambiant, les dimensions du tuyau, le débit d'air, la profondeur d'enfouissement ainsi que les propriétés thermiques du sol.

Une étude sur un tel système est présentée dans le travail [10] où l'échangeur de chaleur est formé à partir d'un tuyau en PVC (chlorure de polyvinyle) d'une longueur L , un diamètre intérieur D_i et d'une épaisseur de 5mm, enfouis dans le sol. L'air extérieur chaud est pompé à

travers le tuyau enterré à l'aide d'un ventilateur adéquat. Ensuite, lors de son passage, il se refroidit en échangeant une quantité de chaleur avec le sol. Enfin, l'air refroidi est injecté dans le bâtiment (Figure 2-6).

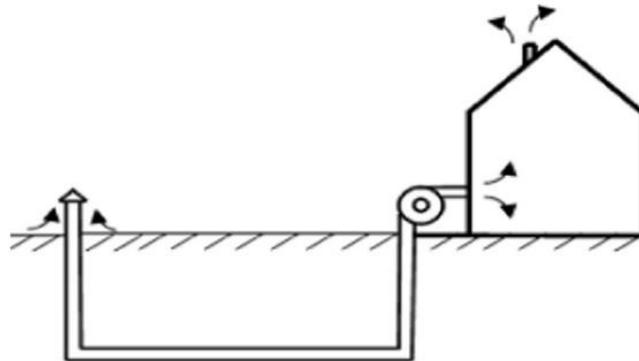


Figure 2-6. Schéma du système EAHE avec ventilation [10]

Un modèle a été développé pour l'étude de la performance thermique des échangeurs Sol-Air (EAHE), sous les conditions d'été au Sahara algérien. Ainsi, les résultats ont montré que la température de sortie de l'air diminue avec l'augmentation de la longueur du tube. Cependant, cette température augmente avec l'augmentation de la section transversale de la conduite. Comme on observe également que l'augmentation de la vitesse de l'air provoque l'augmentation de la température ainsi qu'une diminution rapide du coefficient de performance.

2.3.2. Echangeur Sol-Air assisté par une tour à vent :

Un système de refroidissement utilisé pendant les saisons chaudes dans les régions Sahariennes Algérienne. Il s'agit d'un échangeur sol-air (EAHE) assisté par une tour à vent. Une analyse des performances, réalisée par M. Benhammou [11] d'un tel système pour le refroidissement passif d'une maison au climat Saharien très chaud.

Le système étudié (Figure 2-7) est essentiellement composé d'un tuyau en PVC (polychlorure de vinyle) enterré à une profondeur de 2 m dans le sol. Le tuyau enterré a une longueur L et un diamètre intérieur Di . La sortie de la canalisation enterrée est intégrée dans le bâtiment tandis que l'entrée est reliée à la tour à vent dont l'ouverture est constamment orientée face à la direction du vent. L'air chaud ambiant pénètre dans la tour à vent grâce à la différence de pression due à l'action du vent. Ensuite, l'air passe à travers jusqu'au fond où rentre dans le tuyau enterré au sol. Ainsi, il se refroidit en raison de l'échange de chaleur avec le sol. A la sortie de l'échangeur, l'air frais est injecté dans le bâtiment et par conséquent il le rafraîchira progressivement avec le temps.

Un modèle analytique transitoire a été développé afin d'étudier l'influence des paramètres de conception sur la performance de l'EAHE. Ainsi, il est évident que le système est plus influencé par la vitesse d'écoulement de l'air. En outre, pour une profondeur de 2m d'enfouissement et pour la période de Juillet où la température ambiante dépasse 45 °C, cette étude a démontré que les dimensions de la tour du vent (hauteur, section transversale) n'ont pas un impact important par rapport aux dimensions de la tuyauterie (longueur, diamètre). Ils ont constaté qu'une tour avec une hauteur totale de 5,1 m et une aire de section transversale de

0,57m² peut générer un débit d'air de 592,61m³/h. En outre, il a également été observé que le potentiel de refroidissement par jour atteint un maximum de 30,7 kWh correspondant à une longueur de tuyauterie de 70 m.

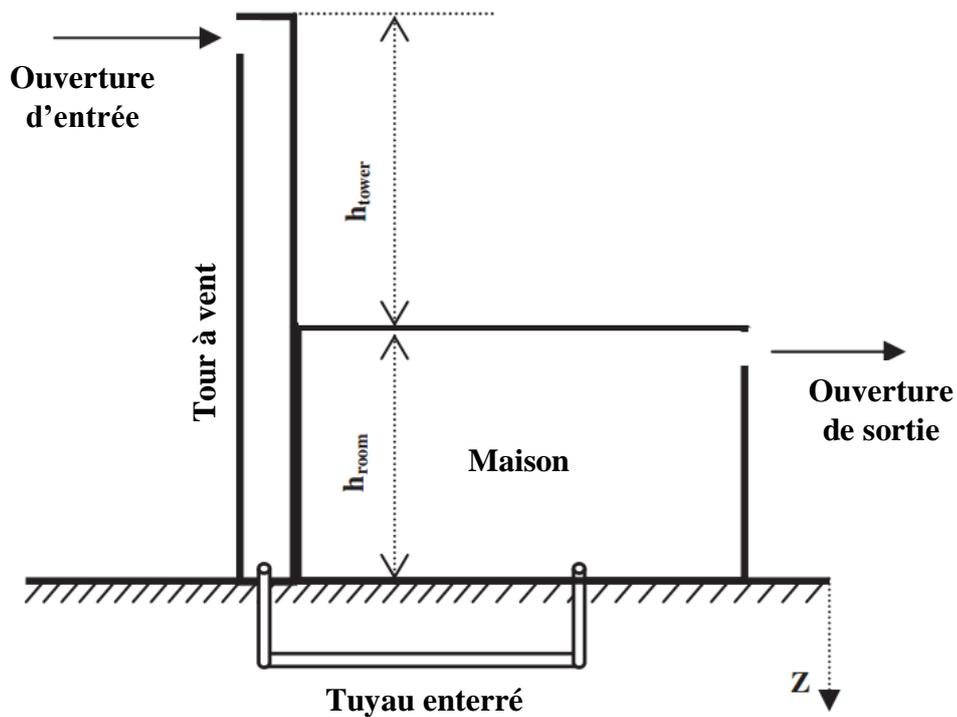


Figure 2-7. Schéma du système de refroidissement EAHE avec une tour à vent [11]

L'efficacité de refroidissement du système est comparée à celle d'un autre dispositif passif traditionnel qui consiste en une tour à vent à surfaces humides. Et les résultats indiquent que l'air ambiant se refroidit plus à travers son passage dans l'EAHE que celui obtenu lors d'un passage dans une tour à surfaces humides.

Chapitre 3

Production du froid par les systèmes actifs

Les systèmes actifs de réfrigération sont les plus répandus dans le marché. Ils sont utilisés lorsque le besoin en froid n'est pas satisfait par des procédés de refroidissement passifs. Alors, la réfrigération permet d'obtenir et de maintenir un système (local, produit, etc.) à une température inférieure à celle de l'environnement.

Comme on vient de le voir précédemment, il existe deux grandes familles des systèmes actifs pour la production du froid ; les systèmes mécano-frigorifiques et les systèmes thermo-frigorifiques.

3.1. Systèmes mécano-frigorifiques :

Ces dispositifs de réfrigération utilisent un travail mécanique ou équivalent (électrique, magnétique...) afin de pomper de la chaleur dans un milieu à basse température vers un autre de haute température. On présente dans ce travail quatre systèmes dont le cycle de réfrigération fonctionne avec une énergie de haut grade.

3.1.1. Cycles à compression de vapeur :

La plupart des cycles de refroidissement utilisent la capacité calorifique des fluides pour évacuer la chaleur, généralement ce sont les cycles passifs. Le cycle de réfrigération à compression de vapeur utilise la chaleur latente de l'évaporation des réfrigérants afin de transporter un maximum de chaleur vers l'environnement extérieur vu l'importance de la chaleur latente devant la capacité calorifique du fluide [12].

Donc, La fonction première du cycle de réfrigération est de prélever de la chaleur à une zone de basse température afin de la dissiper dans le milieu ambiant. D'après le second principe de la thermodynamique, la chaleur ne peut passer spontanément d'une région froide à une région plus chaude. Par conséquent, une machine frigorifique a besoin d'une intervention extérieure (un apport d'énergie) pour faire fonctionner le cycle. Ainsi, dans le cycle à compression de vapeur, l'apport d'énergie est sous forme d'un travail fourni par un compresseur mécanique au réfrigérant en augmentant sa pression.

Le réfrigérant sort de l'orifice HP (haute pression) du compresseur à l'état gazeux avec une température plus chaude. Traversant le côté HP, le réfrigérant perd beaucoup de calories lors de son passage dans le condenseur, et il se condense en effectuant un changement d'état. Le détendeur est donc alimenté en réfrigérant à l'état liquide. La tuyauterie située entre le condenseur et le détendeur s'appelle à juste titre : ligne liquide. La vanne de détente crée une restriction induisant une chute de pression du réfrigérant qui alimente le côté BP (basse pression). À la sortie du détendeur, on observe une chute de pression importante ainsi qu'une chute de température du réfrigérant. Par conséquent, le réfrigérant est alors en mélange diphasique. Puis en traversant l'évaporateur, un changement d'état est à nouveau observé. En

effet la partie liquide du fluide entre en ébullition en absorbant les calories qui sont au voisinage de l'évaporateur. Le fluide à l'état gazeux est alors aspiré par l'orifice BP du compresseur et le cycle se renouvelle [13].

La température à laquelle un fluide s'évapore (ou une vapeur se condense) est fonction de la pression. Si un fluide ayant les caractéristiques requises est introduit dans le système, il s'évapore à basse température dans l'évaporateur où règne une basse pression (en recevant de la chaleur) et se condense à une température plus élevée dans le condenseur où règne une haute pression (en rejetant de la chaleur). Le liquide haute pression formé dans le condenseur doit alors être restitué à l'évaporateur à débit régulé.

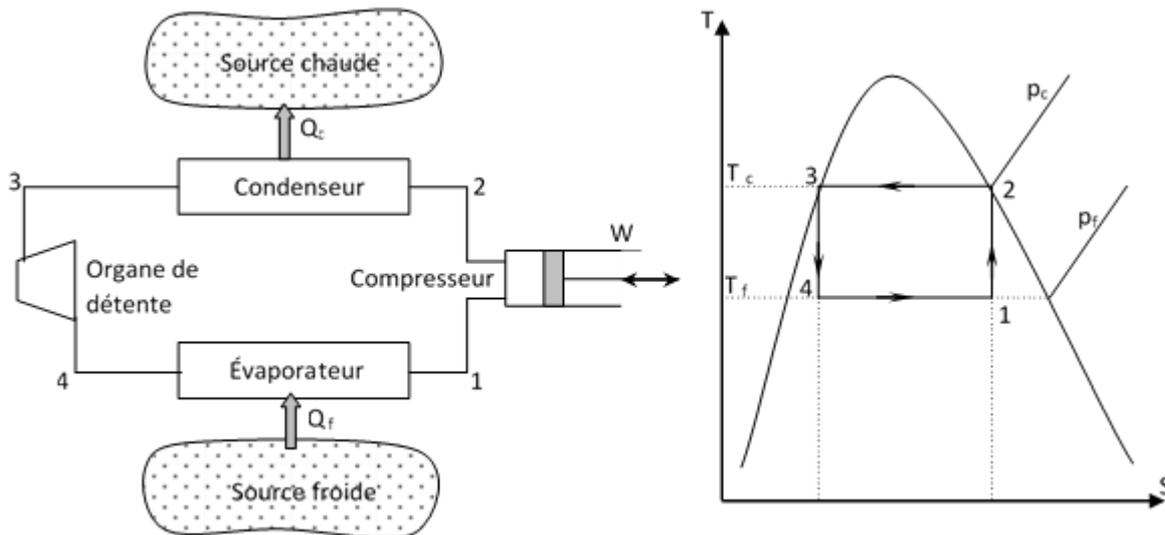


Figure 3-1. Schéma de principe d'un cycle frigorifique idéal opérant réversiblement suivant le cycle de Carnot.

Pour la réfrigération, le cycle simple à compression de vapeur aura donc quatre éléments principaux :

- Un évaporateur où de la chaleur est emmagasinée à faible température à mesure qu'un liquide s'évapore à basse pression
- Un compresseur qui utilise un apport de travail pour augmenter la pression de la vapeur
- Un condenseur où la vapeur haute pression se condense, rejetant de la chaleur dans le milieu ambiant
- Un dispositif de régulation contrôlant le débit de liquide retournant à l'évaporateur et assurant une réduction de la pression.

Le cycle frigorifique à compression de vapeur idéal est un cycle de Carnot. Cependant, en pratique, la compression adiabatique se fait dans le domaine de la vapeur surchauffée, tandis qu'un processus d'étranglement isenthalpique vient remplacer la détente isentropique du cycle idéal, ce qui donne lieu aux représentations suivantes sur les diagrammes T-s et P-h :

Deux classes de fluides frigorigènes synthétiques ont été développées dès les années 1930:

- Les chloro-fluoro-carbures (CFCs)

➤ Les hydro-chloro-fluoro-carbures (HCFCs)

Ces fluides frigorigènes, appelés "Fréons", ont tous une structure moléculaire hautement stable. La production des CFCs avait commencé par le R-11, le R-12, le R-113 et le R-114. Le premier HCFC, le R-22, a été introduit en 1936. Le R-12 est resté le frigorigène le plus répandu pendant plusieurs décennies. Après que les scientifiques ont établi que les CFCs et les HCFCs, à cause notamment du chlore qui entre dans leur composition et de leur stabilité moléculaire,

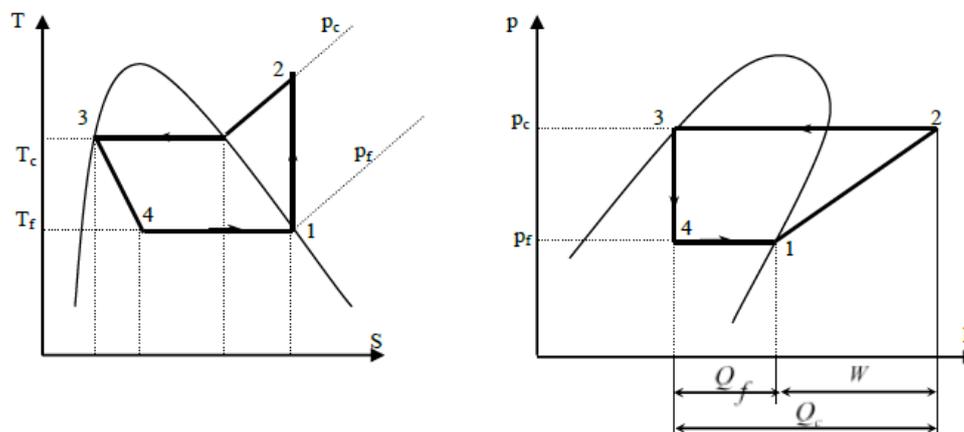


Figure 3-2. Cycle pratique sans pertes

contribuent durablement à la diminution de la couche d'ozone stratosphérique et à l'effet de serre. En 1987, lors du protocole de Montréal sur l'environnement, des accords ont été adoptés par la communauté internationale pour bannir la production de certains fluides frigorigènes chlorés qui appauvrissent la couche d'ozone. Pour les remplacer, une nouvelle classe de produits a vu le jour : les hydro-fluoro-carbures (HFCs). Un de ces produits, le R-134a, a été largement utilisé comme substitut au R-12 durant une vingtaine d'années, avant qu'on s'aperçoive qu'il contribue, à l'instar d'autres HFCs, lourdement et durablement à l'effet de serre. A cause de cela, son usage a été remis en cause. Et c'est ainsi par exemple que, dans le domaine de la climatisation automobile, son remplacement par le gaz carbonique CO₂ (R-744) et le R-1234yf est déjà à l'étude. Le R-22, un HCFC également très largement utilisé sur les installations frigorifiques et de conditionnement d'air durant de longues décennies, a commencé à être retiré du marché depuis un amendement de 1995 au protocole de Montréal. Il est strictement interdit de le charger sur les nouvelles installations à partir de 2010. Pour le remplacer, deux HFCs ont été introduits sur le marché des frigorigènes : le R-410A et le R-407C. Les Frigorigènes Naturels : On retrouve dans cette catégorie : le gaz carbonique (CO₂), l'ammoniac (NH₃) et certains hydrocarbures. Leur potentiel de réchauffement global (PRG) est relativement faible. L'ammoniac (R-717), qui a largement accompagné les premiers développements du système frigorifique à compression de vapeur, continue à servir aujourd'hui comme fluide frigorigène dans les grandes installations de l'industrie agroalimentaire et d'autres applications industrielles [14].

3.1.2. Réfrigération magnétique :

Le fonctionnement de la quasi-totalité des systèmes actuels de production du froid est basé sur le principe thermodynamique de compression et de détente d'un fluide frigorigène. Cette

technologie, datant des années 1920, a l'avantage d'être tout à fait mature. Elle s'accompagne cependant d'une consommation énergétique et d'une pollution qu'il faut aujourd'hui réduire en modifiant d'une part les habitudes pour une utilisation rationnelle de l'énergie et d'autre part en développant des technologies moins énergivores et plus respectueuses de l'environnement.

La réfrigération magnétique, basée sur l'effet magnétocalorique, est une thématique relativement récente et prometteuse devant permettre de réaliser des systèmes avec moins de consommation que ceux de la technologie conventionnelle et sans impact négatif sur l'environnement.

L'EMC est une propriété intrinsèque de certains matériaux qui peuvent s'échauffer ou se refroidir quand on les aimante ou désaimante. Cet effet est maximal autour de la température de transition de phase magnétique du matériau et peut être exploité pour faire un cycle thermomagnétique équivalent au cycle de compression et détente d'un gaz. La réfrigération magnétique à température ambiante apparaît donc comme une solution de rupture, permettant de réaliser des systèmes plus efficaces et moins polluants.

Cependant, l'exploitation directe de l'EMC ne permet pas aujourd'hui de dépasser quelques degrés de ΔT dans le cas des meilleurs matériaux (Gadolinium), pour des systèmes aimants permanents. L'amplification de la différence de température peut être obtenue grâce aux cycles de réfrigération magnétique active à récupération AMRR (Active Magnetic Regenerative Refrigeration). Le principe de l'AMRR est de créer, par des jeux d'échange thermique entre le matériau et un fluide intermédiaire, un gradient de température le long du matériau (Figure 3-3) Ce gradient s'amplifie à chaque cycle pour atteindre les températures de source chaude T_c et froide T_f à chaque extrémité.

Même si l'EMC, phénomène physique mis en œuvre, est connu depuis plus d'un siècle, la recherche dans ce domaine n'a réellement démarré qu'il y a environ 17 ans suite à la découverte de nouveaux matériaux à EMC géant autour de la température ambiante par Gschneidner et Pecharsky [15] et la démonstration par Zimm et al de la faisabilité de la réfrigération magnétique [16].

La Figure 3-4 montre le dispositif de réfrigération développé par Zimm. Cet appareil décrit les principales données utiles qui permettent d'évaluer les performances de la réfrigération magnétique. Il se compose de deux paquets contenant chacun 1,5kg de gadolinium (99,9%) sous forme de sphères de 150 à 300 micromètres de diamètre. Ses paquets se déplacent alternativement dans un champ d'un aimant supraconducteur grâce à un vérin pneumatique qui

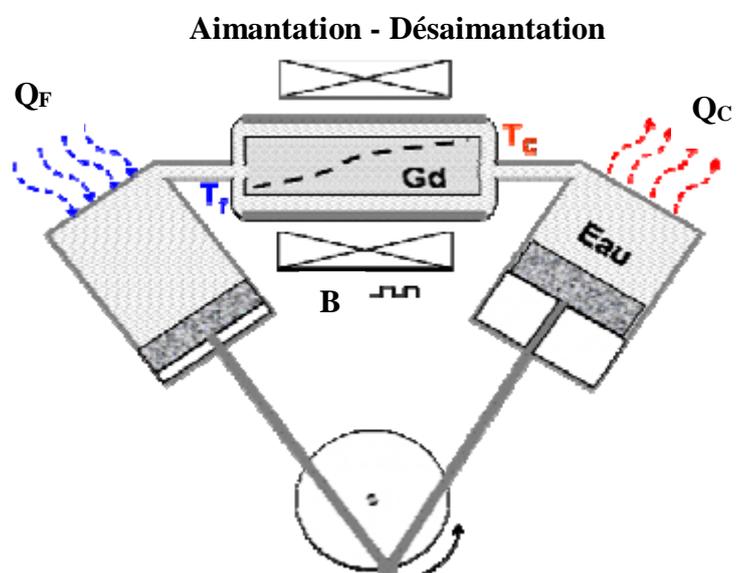


Figure 3-3. Schéma de principe de l'AMRR, le matériau EMC géant est ici le Gadolinium et le fluide caloporteur est de l'eau [34]

peut développer une force de 2500N. Les paramètres du cycle AMRR (Active Magnetic Regenerative Refrigeration) mis en œuvre sont :

- ✓ Fréquence du cycle égale à 0,17 Hz
- ✓ Eau comme fluide d'échange d'un débit de 5 litres/min
- ✓ Source du champ de type aimant supraconducteur de 1,5 à 5 Tesla

Ainsi, cette machine a donnée comme résultats une puissance de 600W pour une différence de température de 10°C, avec un coefficient de performance COP estimé en moyenne à 6.

Depuis, des avancées importantes et multiples ont été réalisées à l'échelle fondamentale et applicative dans le domaine du matériau et du système. Elles ont aussi progressivement montré que c'est une thématique complexe, fortement pluridisciplinaire qui nécessite une analyse de toutes les physiques mises en jeu ainsi que des investigations expérimentales et de modélisations de plus en plus poussées. Les travaux s'articulent autour des principaux axes suivants :

- ✓ Analyse de l'EMC et recherche de matériau à haut pouvoir magnéto-calorique [17], [18]
- ✓ Analyse et modélisation des cycles thermodynamiques [19]
- ✓ Conception, réalisation de dispositifs de réfrigération magnétique [20], [21]

La *Figure 3-5* décrit le fonctionnement d'un cycle de réfrigération magnétique et fait l'analogie avec son équivalent par compression-détente.

Au début du cycle de réfrigération magnétique, aucun champ n'est appliqué, le système est à la température ambiante T_0 .

1. L'application du champ H entraîne l'alignement des moments magnétiques du matériau provoquant une élévation de la température ($T > T_0$).
2. Le passage d'un fluide provenant de la source chaude permet, par échange thermique, de revenir à la température initiale T_0 .

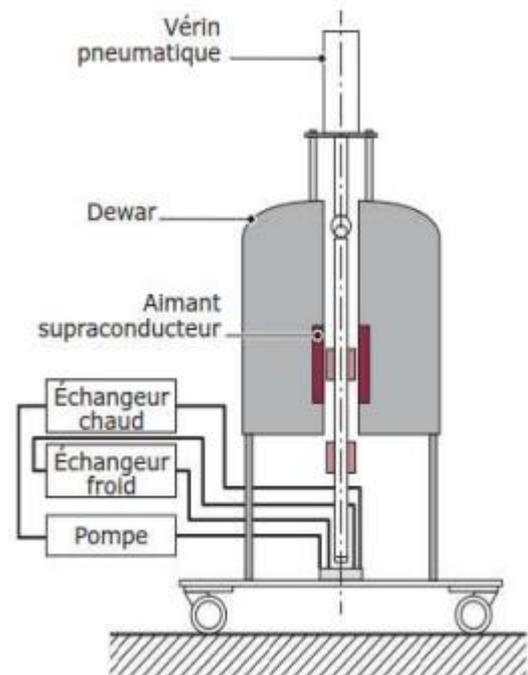


Figure 3-4. Dispositif de réfrigération magnétique développé par Zimm et al [16]

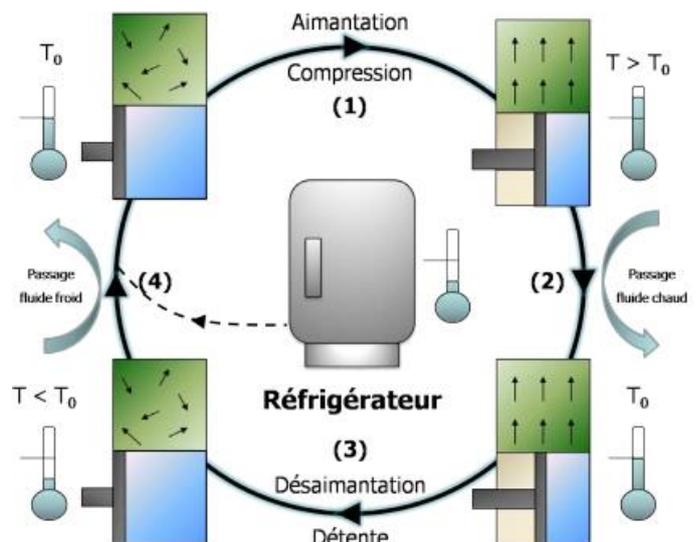


Figure 3-5. Analogie entre le cycle compression-détente traditionnel et le cycle de réfrigération magnétique [32]

3. L'annulation du champ magnétique H provoque la désaimantation du matériau et donc une diminution de la température ($T < T_0$).
4. Un nouvel échange thermique, cette fois avec un fluide provenant de la source froide, termine le cycle.

A partir de l'EMC, on réalise des cycles thermodynamiques pour faire de la réfrigération.

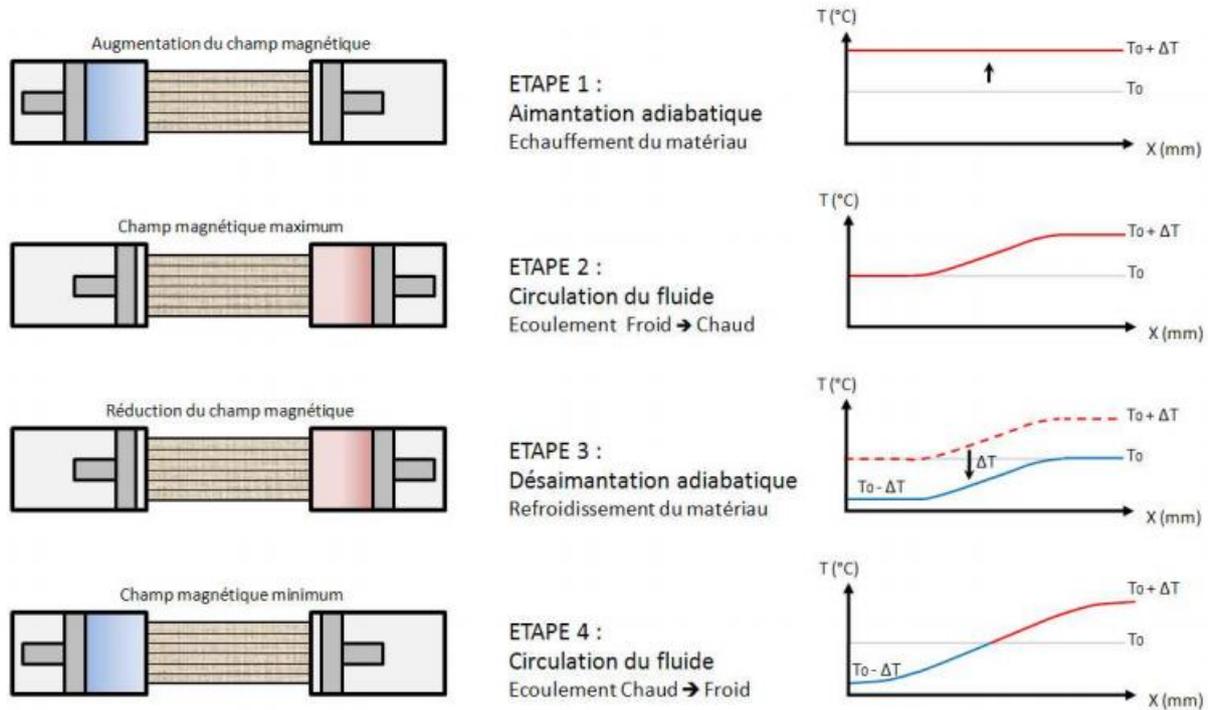


Figure 3-6. Profil de température associé à l'AMRR [35]

Classiquement on utilise le cycle de Brayton (Figure 3-7), décomposé en quatre phases :

1. Une aimantation adiabatique
2. Un échange de chaleur q_{hot} iso-champ H avec la source chaude
3. Une désaimantation adiabatique
4. Un échange de chaleur q_{cold} iso-champ avec la source froide

L'écart de température entre la source froide et la source chaude est noté ΔT_{source}

Les paramètres utilisés pour définir les performances des matériaux sont la variation de température dans des conditions adiabatique ΔT_{adia} et la variation d'entropie isotherme entre 0 Tesla et la valeur de champ indiquée, ici prise égale à 1 Tesla, notée ΔS_{1T} . Ils sont représentés sur la (Figure 3-7) par les deux flèches noires. De plus l'EMC étant maximal à la température de Curie, celle-ci doit être précisée.

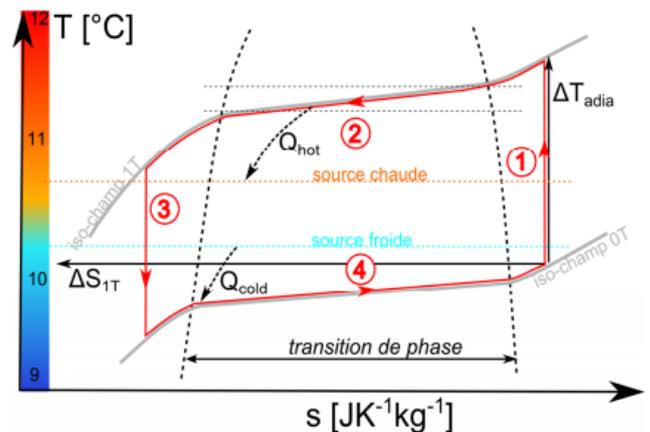


Figure 3-7. Cycle élémentaire de Brayton pour un matériau avec une transition de phase de premier ordre [33]

Par conséquent, Ce procédé présente de nombreux avantages ; (i) il n'emploie pas de gaz responsables du réchauffement de l'atmosphère ou de la destruction de la couche d'ozone, (ii) l'absence de compresseur le rend silencieux, (iii) il est peu gourmand en énergie car le champ magnétique est fourni par des aimants permanents, et seul le moteur assurant le déplacement du matériau ainsi que les pompes responsables de la circulation des fluides frigorigènes nécessitent de l'électricité ainsi que (iv) son rendement énergétique est meilleur que celui des systèmes actuels.

3.1.3. Systèmes thermoélectriques :

L'histoire de la thermoélectricité a débuté par la découverte du physicien allemand Thomas Johann Seebeck en 1821, une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température. L'utilisation la plus connue de l'effet Seebeck est la mesure de température à l'aide de thermocouples. Quelques années plus tard, en 1834, le physicien français Jean Peltier découvrit l'effet thermoélectrique Inverse : une différence de température apparaît aux jonctions de deux matériaux de natures différentes soumis à un courant électrique. C'est ce dernier qui est mis en œuvre dans la réfrigération thermoélectrique. Il s'agit d'un couplage entre deux phénomènes de transport : charges électriques et quantités de chaleurs. Deux propriétés intrinsèques du matériau sont alors mises en jeu la conductivité électrique et la conductivité thermique.

Le principe de refroidissement par effet Peltier est schématisé dans la *Figure 3-8*. Il s'agit d'un module constitué de deux couples connectés électriquement. Chacun des couples est constitué d'un matériau semi-conducteur dopé p (trous : pouvoir thermoélectrique positif) et d'un matériau semi-conducteur dopé N (électrons : pouvoir thermoélectrique négatif). Ces deux matériaux sont connectés à une source de courant ou de tension par un matériau conducteur électrique dont le pouvoir thermoélectrique est généralement négligeable. Par effet Peltier, le passage de courant dans le matériau Induit un flux thermique dans le même sens que le déplacement de ces charges. Pour disposer d'un maximum de flux thermique plusieurs éléments (N et P) sont connectés en série électriquement et en parallèle thermiquement.

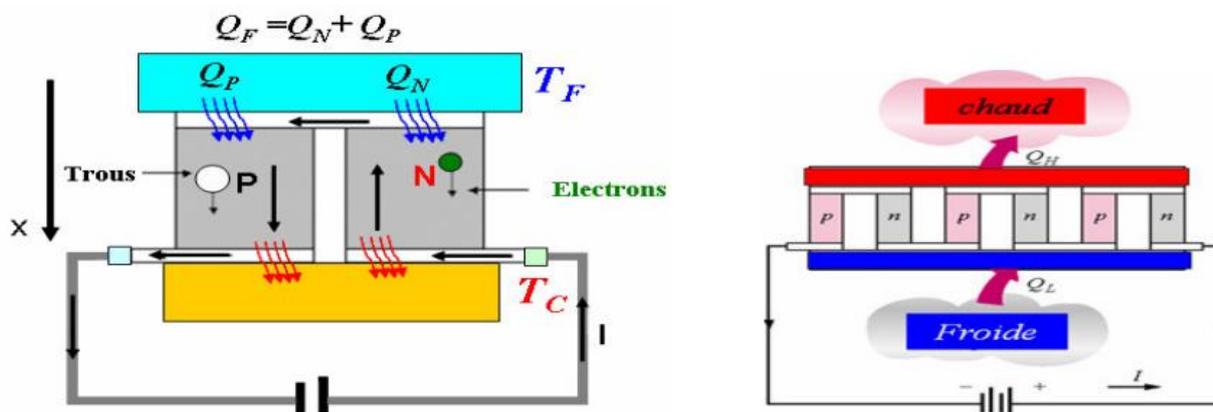


Figure 3-8. Schématisation du principe de refroidissement par effet de Peltier

Le rendement associé à la conversion d'énergie d'un système de réfrigération thermoélectrique dépend des températures de source chaude T_c et froide T_f et de ZT appelé facteur de mérite qui caractérise les propriétés de transport du matériau.

$$ZT = S^2 \frac{\sigma}{\lambda} T \quad (3-1)$$

Avec, S : coefficient de Seebeck, σ : conductivité électrique du matériau, λ : Conductivité thermique du matériau.

L'optimisation de matériaux pour une utilisation dans la conversion d'énergie par effet thermoélectrique passe donc nécessairement par l'optimisation de leurs propriétés de transport électriques et thermiques de manière à maximiser le facteur de mérite ZT . Comme on peut le constater d'après l'expression (3-1), un bon matériau thermoélectrique possèdera simultanément un coefficient de Seebeck élevé, une conductivité électrique élevée et une conductivité thermique faible. En règle générale, "un bon conducteur thermique est un bon conducteur électrique" Les matériaux type semi-conducteurs dopés ont le meilleur facteur de mérite. Comme les propriétés de transport d'un matériau dépendent fortement de la température, les performances des matériaux thermoélectriques sont définies suivant des plage de température d'utilisation. Dans la gamme de température ambiante l'alliage Bi_2Te_3 (Tellure de Bismuth) se distingue par ses propriétés thermoélectriques, il est utilisé dans la majorité des dispositifs de réfrigération thermoélectrique. Les meilleurs performances ($ZT=1$) sont obtenues lorsqu'il est associé à Sb_2Te_3 (Tellure d'Antimoine) qui possède la même structure cristalline. En termes de rendement, il faudrait des matériaux avec $ZT=3$ pour pouvoir développer des réfrigérateurs concurrentiels. Cependant, pour des faibles puissances (dizaine de watt) et pour des applications portables, cette technologie semble très intéressante de par sa simplicité de fonctionnement (pas de pièces en mouvement). Au-delà se pose le problème de la puissance à évacuer et de la consommation électrique.

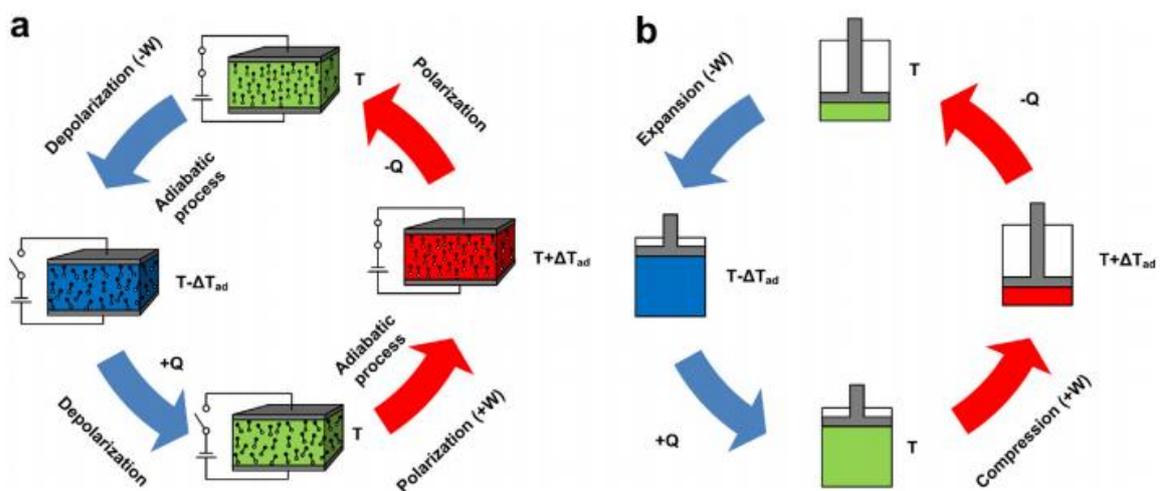


Figure 3-9. Comparaison entre le cycle de réfrigération thermoélectrique et celui de la réfrigération à compression de vapeur [36]

Par rapport à un système de refroidissement par compresseur (tel qu'utilisé notamment dans les réfrigérateurs) Figure 3-9, le refroidissement thermoélectrique par effet Peltier a pour principaux avantages ;

- ✓ Sa simplicité de construction (pas de serpentin, ailettes optionnelles suivant les applications)
- ✓ L'absence d'utilisation de fluide frigorigène (potentiellement dangereux pour l'environnement)
- ✓ Le peu d'entretien nécessaire (pas de pièces d'usure)
- ✓ L'absence de pièce mobile : pas de bruit, de vibrations ou d'usure mécanique
- ✓ La haute résistance des cellules aux contraintes mécaniques en compression (permettant l'utilisation des éléments thermoélectriques comme support mécanique)
- ✓ Un excellent ratio puissance de refroidissement / encombrement : un élément industriel de 55×58 mm peut générer jusqu'à environ 300 W de flux thermique dans des conditions optimales, soit 9.3 W/cm² (associé cependant à un coefficient de performance de 0.5 à 0.75)
- ✓ Supporte les chocs et les secousses, à la différence des circuits de fluides frigorigènes.

Il a en revanche comme principaux inconvénients :

- ✓ Un coefficient de performance corrélé à la différence de température intérieur/extérieur, variant de 0.3 à 11 et généralement inférieur à 1 quand la différence de température excède 20°C
- ✓ Conséquemment à l'affirmation précédente, le refroidissement devient impossible pour des différences de température (intérieur/extérieur) excédant 70 à 85°C suivant les éléments et jusqu'à 123°C pour des éléments à plusieurs étages
- ✓ Un coefficient de performance corrélé à l'intensité du courant électrique d'alimentation et généralement supérieur à 1 uniquement à basse intensité (1 à 30 % de l'intensité maximale d'entrée)
- ✓ Par conséquence, un coefficient de performance élevé (de 1 à 11) seulement pour de petites puissances de refroidissement (10 à 25 % de la puissance de refroidissement maximale)
- ✓ La faible résistance des cellules aux contraintes mécaniques en cisaillement

Le refroidissement par effet Peltier est donc efficace et économe pour des applications nécessitant une faible puissance de refroidissement (jusqu'à quelques dizaines de watts par élément) et fonctionnant à une température proche de l'ambiante (jusqu'à environ 20°C d'écart). Lorsque l'efficacité énergétique n'est pas prioritaire, le refroidissement par effet Peltier reste pertinent pour des applications de petite taille nécessitant des puissances de refroidissement importantes (7.5 à 9.3 W/cm²) et/ou des refroidisseurs légers. Le refroidissement par effet thermoélectrique est en outre la seule option pour le refroidissement en milieu inflammable, explosif ou à sécurité renforcée car la plupart des fluides caloporteurs industriels sont inflammables.

En concluant, des progrès significatifs en termes de facteur ZT (60 – 200% d'amélioration) ont été réalisés ces dernières années avec la découverte de nouveaux matériaux

thermoélectriques. La plupart des matériaux avancés ne sont encore que des matériaux de laboratoire, avec un potentiel de conversion de 12 – 20 %. Le challenge réside à présent dans les moyens d'intégrer ces nouveaux matériaux dans des modules thermoélectriques pour élargir le champ des applications actuelles.

La technologie thermoélectrique peut jouer un rôle dans la climatisation (automobile, bâtiment...) mais aussi dans la génération d'électricité en permettant la valorisation des énormes quantités de chaleur perdues quotidiennement dans notre environnement. Des efforts de recherche et de développement importants sont, par exemple, déployés pour tenter d'intégrer des générateurs thermoélectriques sur la ligne du pot d'échappement des voitures ou des camions avec pour objectif de diminuer la consommation de carburant de l'ordre de 10 %.

3.2. Systèmes thermo-frigorifiques :

Les systèmes thermo-frigorifiques sont des dispositifs de réfrigération utilisant de l'énergie thermique afin de faire fonctionner le fluide frigorigène. Parmi ces systèmes de réfrigération, on cite la réfrigération à la sorption et la réfrigération à éjecteur.

3.2.1. Réfrigération à sorption :

3.2.1.1. Réfrigération à adsorption :

Deux grandes catégories de systèmes à adsorption peuvent être distinguées : continu et intermittent, mais en fonction de l'utilisation, ces cycles sont plus ou moins adaptés à l'utilisation de l'énergie solaire [22]. Un procédé intermittent dans le cadre de la réfrigération pour la conservation de vaccins par exemple, est tout à fait adapté à l'énergie solaire car le fonctionnement est journalier [23]. Une utilisation du froid produit sur une plus longue période implique alors son stockage systématique dans un matériau à changement de phase par exemple. Par contre, lorsque le but est de rafraîchir un bâtiment, un système continu est mieux adapté car si, par exemple, la journée précédente les conditions météorologiques étaient médiocres, le système ne serait pas capable de remplir son objectif. De plus, ces cycles peuvent être opérationnels sans pièces mobiles hormis quelques électrovannes. Il en résulte de faibles vibrations, une simplicité mécanique, une fiabilité et une longue durée de vie [24].

Une autre catégorisation structurelle des systèmes à adsorption concerne la nature de l'effet, c'est-à-dire si le phénomène est physique ou s'il comprend une réaction chimique.

Les machines frigorifiques à adsorption fonctionnent grâce à la faculté de certains solides, d'adsorber (réaction exothermique) et de désorber (réaction endothermique) une vapeur à la surface du matériau qui les constitue (pouvant atteindre plusieurs dizaines de m² par gramme). L'adsorption est un phénomène largement connu et très utilisé notamment dans la capture de gaz (traitement de l'air, dépollution, industrie chimique...). La mise en œuvre d'une machine frigorifique fonctionnant selon ce principe requiert la présence de deux enceintes dont l'une contient le solide adsorbant, l'autre constituant le réservoir de fluide frigorigène. La présence d'un solide empêche toute circulation entre les éléments, si bien que le fonctionnement est cyclique : à une phase de production frigorifique doit succéder une phase de régénération afin

de remettre le système dans un état apte à produire à nouveau du froid [39, 40]. Les associations sorbant/sorbat [41] les plus connues et utilisées sont :

- ✓ Zéolithe/Eau
- ✓ Silicagel/Eau
- ✓ Charbon actif/Méthanol.

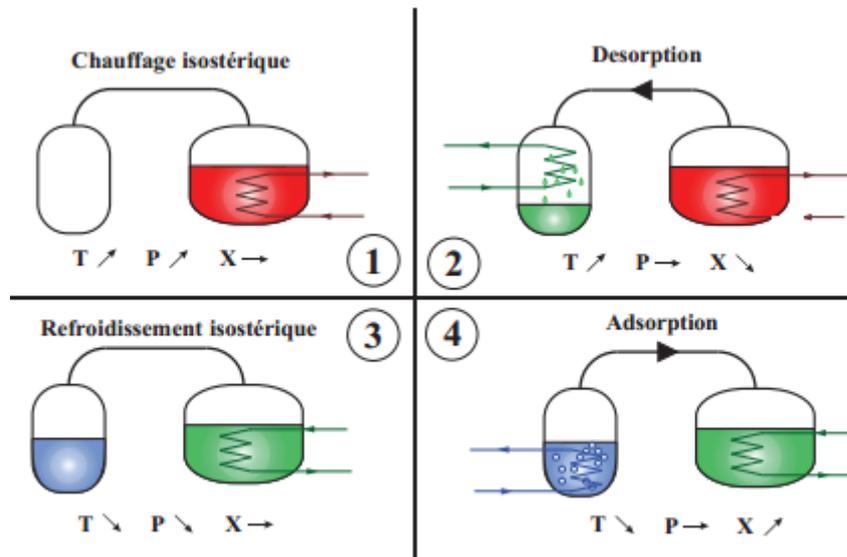


Figure 3-10. Schéma de principe d'une machine à adsorption [24]

Le principe de fonctionnement est assez simple et se scinde en 4 phases, comme présenté sur la Figure 3-10. L'apport de chaleur au solide provoque une légère désorption qui pressurise progressivement l'ensemble désorbateur/condenseur. Cette étape rapide consomme peu de chaleur et désorbe si peu de gaz qu'elle s'effectue en supposant une transformation à composition constante (rapport de la masse de fluide frigorigène sur la masse d'adsorbant) que l'on nomme aussi isostérique. Lorsque la pression qui règne dans le système atteint la pression de saturation du fluide frigorigène correspondant à la température du condenseur T_m , alors débute la condensation. Si on suppose que cette dernière impose alors sa pression à l'enceinte contenant le sorbant, la désorption proprement dite débute. Le point caractéristique du solide se déplace alors suivant une isobare vers les plus hautes températures en désorbant le fluide frigorigène qui va ensuite se condenser. Cette deuxième étape s'achève lorsque le désorbateur atteint la température maximale du cycle T_h . La troisième étape est assez similaire à la première et s'effectue par dépressurisation en suivant une isostère (composition constante) à cause du refroidissement du système. Lorsque ce dernier atteint la pression à laquelle a lieu l'évaporation proprement dite, alors débute la phase de production frigorifique. Le solide contenu dans l'enceinte adsorbe alors le gaz en provenance de l'évaporateur en libérant la chaleur d'adsorption. L'adsorption s'achève lorsque la température T_m est atteinte dans le solide et que tout le fluide frigorigène a été évaporé puis adsorbé. La production frigorifique s'arrête et le système doit alors être régénéré pour pouvoir produire à nouveau.

Les machines frigorifiques thermochimiques fonctionnent grâce à la faculté de certains solides à réagir chimiquement avec une vapeur. La réaction mise en jeu doit être réversible,

c'est-à-dire que dans un sens à lieu la synthèse du gaz par le solide (réaction exothermique) et dans l'autre la décomposition de la vapeur par le réactif (réaction endothermique). Après un cycle de synthèse/décomposition, le réactif se trouve dans les mêmes conditions qu'au préalable, si bien qu'une machine frigorifique fonctionnant selon ce principe se comporte exactement comme une machine à adsorption et subit 4 étapes durant son cycle :

- ✓ Chauffage – pressurisation
- ✓ Décomposition – condensation,
- ✓ Refroidissement – dépressurisation
- ✓ Synthèse – évaporation.

3.2.2. Réfrigérateur à absorption :

Le réfrigérateur à absorption utilise une source de chaleur, au lieu d'un travail électrique d'un compresseur, pour faire tourner le cycle qui permettra d'extraire la chaleur. Ce mode de fonctionnement est intéressant lorsqu'on veut réduire la consommation en électricité, et lorsque l'on dispose d'une source de chaleur pratiquement gratuite par exemple dans notre cas un fort ensoleillement.

La méthode de réfrigération par absorption utilise un cycle purement thermique qui repose sur des différences d'affinités entre deux corps, suivant leurs conditions thermodynamiques : pression, température, concentration.

Alors, cette technique utilise l'attraction physique ou chimique entre une paire de

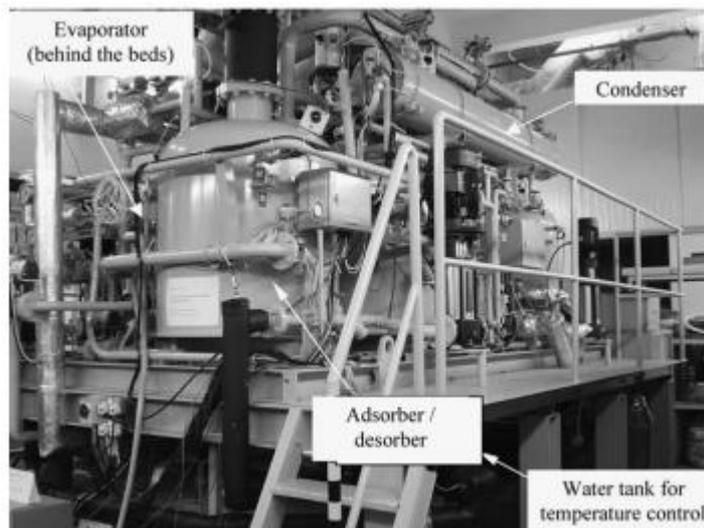


Figure 3-11. Machine de réfrigération à adsorption [37]

substances pour produire l'effet de réfrigération. Un système de sorption a des possibilités uniques de transformer l'énergie thermique directement en puissance frigorifique. Les deux mélanges actuellement utilisés en réfrigération sont ($H_2O/LiBr$) et (NH_3/H_2O). L'eau dans ces deux solutions peut créer une confusion puisqu'il joue soit le rôle frigorigène dans la solution de l'eau + bromure de lithium ou bien le rôle de l'absorbant dans la solution de l'ammoniac + l'eau. Alors, il apparaît immédiatement que selon le couple étudié, la désorption

du frigorigène conduit à une augmentation de la concentration x_{LiBr} , pour le mélange ($H_2O/LiBr$), et inversement à une diminution de la concentration x_{NH_3} pour le couple (NH_3/H_2O). Par opposition, l'absorption de fluide frigorigène impliquera respectivement une diminution de x_{LiBr} , et une augmentation de x_{NH_3} . [25]

Le composant où la sorption a lieu est dénoté comme absorbeur et celui où la désorption a lieu est dénoté comme générateur ou bien bouilleur. Ajouté à ces composants principaux, le réfrigérateur à absorption contient aussi un condenseur, un détendeur, un économiseur de chaleur et un évaporateur (Figure 3-12. Structure d'une machine frigorifique à absorption $H_2O/LiBr$ Figure 3-12). L'ensemble condenseur/détendeur/évaporateur, dans lequel ne transite que le fluide frigorigène pur, est connecté à la partie motrice du procédé, chargée de modifier l'état du frigorigène évaporé pour le rendre condensable à la température de l'environnement.

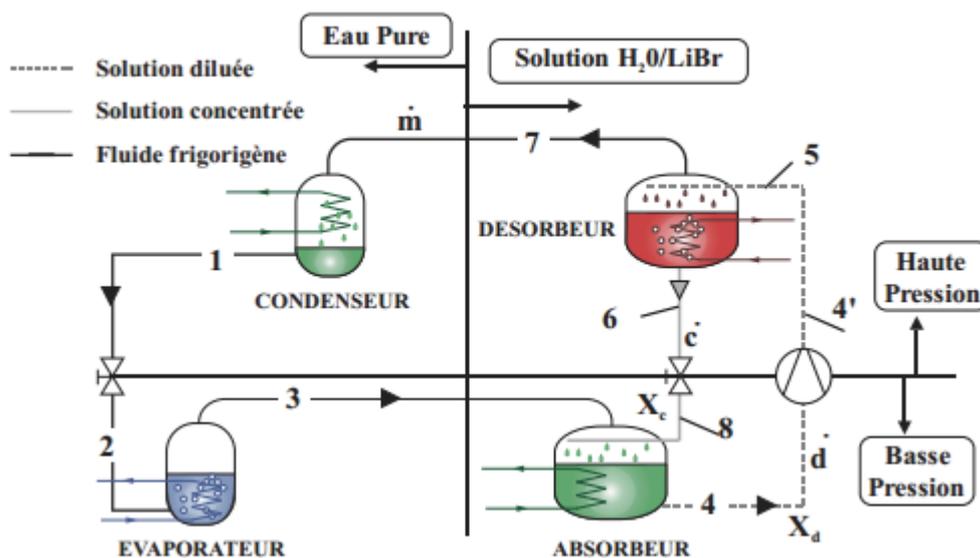


Figure 3-12. Structure d'une machine frigorifique à absorption $H_2O/LiBr$ [24]

Le condenseur est un composant analogue à celui des machines à compression de vapeur. C'est la température du condenseur (T_m) qui fixe la température de condensation et donc la pression dans l'ensemble générateur/condenseur (Haute Pression). La condensation nécessite le rejet de la chaleur de condensation q_c . Le trajet de 7 à 1 comprend une phase de désurchauffe, la condensation ainsi qu'un éventuel sous refroidissement.

L'évaporateur : à la sortie du condenseur (1), le fluide frigorigène liquide subit un laminage à travers le détendeur de 1 à 2. Puis, le fluide s'évapore grâce à la chaleur du milieu à refroidir produisant ainsi la puissance frigorifique q_{ev} de 2 à 3. La pression dans l'ensemble évaporateur/absorbeur (Basse Pression), est fixée par la température (T_b) de la source froide.

L'absorbeur : la vapeur issue de l'évaporateur (3) rencontre au sein de celui-ci la solution concentrée (dite pauvre en frigorigène) provenant du générateur (8). Cette solution absorbe la vapeur et s'enrichit en frigorigène. Cette transformation étant exothermique, la chaleur dégagée \dot{Q}_a est évacuée à la température (T_m) de l'absorbeur. En sortie d'absorbeur (4), on obtient ainsi une solution diluée (riche en fluide frigorigène). Ce composant effectue un enrichissement en fluide frigorigène.

Le générateur : la solution diluée (5) reçoit dans celui-ci la quantité de chaleur q_g à la haute température (T_h), provoquant ainsi la désorption d'une partie du fluide frigorigène dissous dans la solution (réaction endothermique). Le générateur produit alors de la vapeur d'eau (7) et une solution concentrée en bromure de lithium (6). Cet organe réalise un appauvrissement en fluide frigorigène.

La différence de pression entre l'ensemble absorbeur/évaporateur (basse pression, p_b) et le générateur/condenseur (haute pression, p_h) nécessite en outre la présence :

- ✓ D'un détendeur sur le circuit de fluide frigorigène entre 1 et 2
- ✓ D'un détendeur sur le circuit de solution concentrée (pauvre en fluide frigorigène) entre 6 et 8
- ✓ D'une pompe sur le circuit de la solution diluée (riche en fluide frigorigène) entre 4 et 4'

Notons que le fluide qui traverse la pompe est un liquide. Le travail mécanique que réalise cette dernière étant sous la forme $\int v dp$, on peut en conclure qu'il sera très faible devant les puissances thermiques mises en jeu dans un tel cycle.

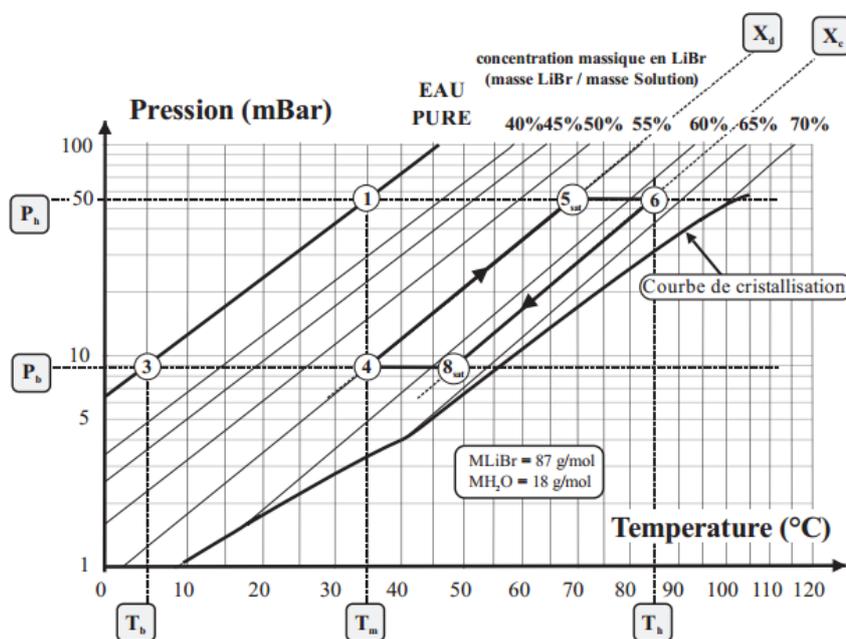


Figure 3-13. Représentation du cycle à absorption sur un diagramme d'Oldham, couple H₂O/LiBr [24]

Le diagramme d'Oldham (Figure 3-13) est le plus utilisé et le plus pratique pour une étude du cycle de la solution. Il donne la concentration massique de la solution en soluté en fonction de la température et de la pression. C'est un diagramme $(\ln(p), -1/T)$, paramétré en concentration massique. La Figure 2 présente un tel diagramme relatif au couple H₂O/LiBr.

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

Tableau 3-1. Comparatif des avantages et inconvénients entre les deux systèmes de sorption [26]

| Système | Avantages | Inconvénients |
|------------|--|--|
| Absorption | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Seule une partie mobile (pompe) avec la possibilité de ne pas utiliser aucune pièce mobile. ✓ Un petit système à température relativement faible coté générateur de chaleur. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bas COP. ✓ Il ne peut pas atteindre une température d'évaporation très faible. ✓ Le système est assez compliqué |
| Adsorption | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Pas de partie mobile (exception la valve). ✓ Basse température de fonctionnement peut être réalisée. ✓ COP thermique est très élevé par rapport à d'autres systèmes qui utilisent la chaleur | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Poids lourd et une mauvaise conductivité thermique de l'adsorbant. Pour de grande capacité, il peut causer des problèmes à long terme. ✓ L'exigence de basse pression de fonctionnement le rend difficile à parvenir à l'étanchéité de l'air. ✓ Très sensible à basse température en particulier la baisse de température pendant la nuit c'est un système intermittent. |

3.2.3. Réfrigération avec éjecteur :

Un cycle de réfrigération à éjecteurs utilise les rejets thermiques, en général industriels, comme source de chaleur dans la gamme des températures de +60°C à +400°C, pour produire du froid à des niveaux de 0°C à +20°C.

Le système de réfrigération avec éjecteur comme il est illustré par *Figure 3-14*. Il comporte deux cycles fermés (4-6-1-3-4) et (4-5-2-3-4).

- ✓ Le cycle (4-6-1-3-4) constitue le cycle de puissance ou bien la boucle motrice (BM).
- ✓ Le cycle (4-5-2-3-4) constitue le cycle de réfrigération ou bien la boucle frigorifique (BF).

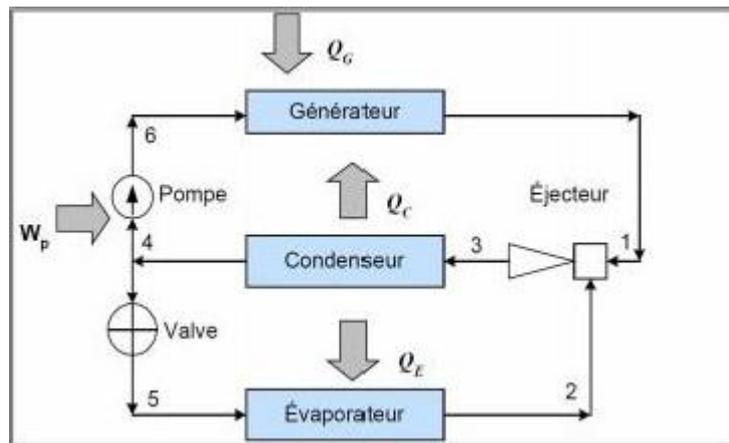


Figure 3-14. Système de réfrigération à éjecteur

3.2.3.1. Cycle de puissance :

Dans le cycle de puissance présenté sur *Figure 3-14*, l'énergie fournie au générateur sert à évaporer une partie du réfrigérant qui représente le fluide moteur (primaire) qui est à haute pression (de l'état 6 à l'état 1), traverse ensuite l'éjecteur où il est mélangé à l'autre partie du réfrigérant qui représente le fluide entraîné (secondaire), provenant de l'évaporateur et où s'effectue aussi un recouvrement de pression (de l'état 1 à l'état 3). Puis la totalité du réfrigérant passe à travers le condenseur où il est condensé jusqu'à l'état liquide (de l'état 3 à l'état 4). Ce liquide sera pompé (augmentation de pression) vers le générateur et complète ainsi le cycle (de l'état 4 à l'état 6).

3.2.3.2. Cycle de réfrigération :

Dans le cycle de réfrigération présenté sur *Figure 3-14*, une partie du réfrigérant à l'état liquide qui représente le fluide entraîné (secondaire) passe à travers une valve de détente pour l'amener à un état de basse pression (de l'état 4 à l'état 5). Le réfrigérant entre par la suite dans l'évaporateur où il produit, en s'évaporant, le froid désiré (de l'état 5 à l'état 2). Le réfrigérant est mélangé avec l'autre partie dans l'éjecteur où il est comprimé (de l'état 2 à l'état 3) et le mélange passe à travers le condenseur où il est condensé jusqu'à l'état liquide et complète ainsi le cycle (de l'état 3 à l'état 4).

3.2.3.3. Influence des conditions opératoires :

Chunnanond (2004) [27] et Sriveerakul (2007) ont montré que la performance d'un éjecteur supersonique représenté par le COP (coefficient de performance pratique) décroît avec ; (i) l'augmentation de la température (et la pression) au générateur, (ii) ou par la diminution de la température (et la pression) à l'évaporateur, (iii) ou par l'augmentation de la température de changement de phase (et la pression) au condenseur. Comme ils ont montré aussi que l'évolution du rapport d'entraînement suit celle du COP.

- ❖ L'effet de la température et de la pression du condenseur : Aphornratana et Eames (1997) [28] ont suggéré que le rapport d'entraînement est limité par une pression

critique au condenseur (à la sortie de l'éjecteur). Cette pression critique dépend des conditions opératoires.

- ❖ L'effet de la température et de la pression du générateur : Aidoun et Ouzzane [29] ont fait une étude sur l'influence de la température du générateur sur du mélange des deux fluides (fluide primaire et fluide secondaire) où ils ont constaté que l'augmentation de la pression du fluide à la sortie de tuyère primaire provoque une diminution du COP du système en diminuant la force d'entraînement pour l'aspiration du fluide secondaire.
- ❖ L'effet de la surchauffe : Aidoun et Ouzzane [29] ont étudié l'influence des surchauffes sur la performance de l'éjecteur. Où ils distinguent deux natures de surchauffes (surchauffe externe - surchauffe interne).

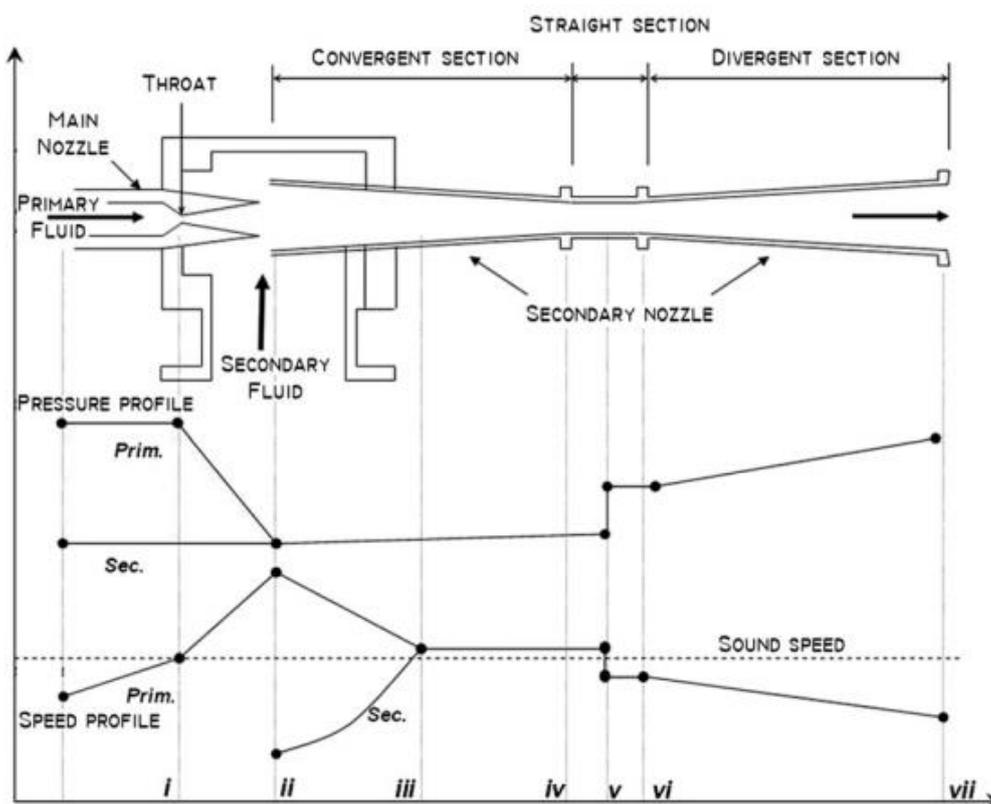


Figure 3-15. Coupe d'un éjecteur et évolution des vitesses et des pressions

Chapitre 4

Application aux éoliennes

Afin d'atteindre une haute efficacité des éoliennes, et garantir une exploitation à long terme et stables, il doit configurer le dispositif de refroidissement nécessaire pour assurer le bon fonctionnement de tous les composants soit ; la boîte de vitesses, le générateur ou bien le convertisseur de commande dans une certaine plage de température. Compte tenu des caractéristiques de la structure et le fonctionnement des éoliennes, le refroidissement actuel de ces trois composants adopte habituellement deux systèmes de refroidissement séparés, qui sont l'ensemble du générateur avec le train d'entraînement, et la boîte de vitesses. Pour les éoliennes de grandes puissance (des MW), les générateurs et les convertisseurs de commande nécessitent généralement l'utilisation du refroidissement, et la boîte de vitesse à un système de lubrification à l'huile réglé par une pompe de circulation.

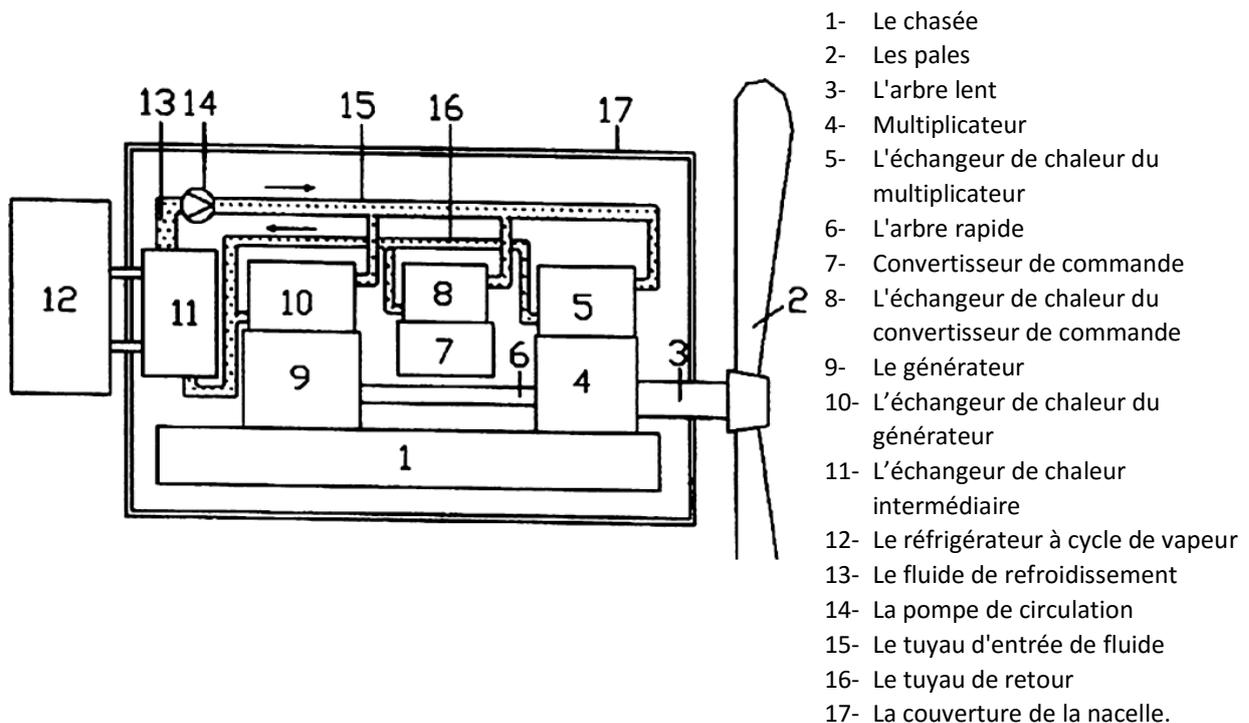


Figure 4-1 : Schéma structurel de la turbine éolienne adoptant un cycle de refroidissement à vapeur [12]

4.1. Cycle de réfrigération à compression de vapeur :

La Figure 4-1 montre le schéma structurel de la turbine éolienne adoptant un cycle de refroidissement à vapeur. Une pompe assure la circulation du fluide dans le circuit intermédiaire. Ce fluide passe par les échangeurs de chaleur de chaque composant : multiplicateur, génératrice et convertisseur de commande successivement en transportant la chaleur des mécanismes afin de l'échanger dans l'évaporateur du cycle de réfrigération.

Alors en concluant, l'application d'un système à cycle de réfrigération à compression de vapeur sur les éoliennes mène à une augmentation de coût en le comparant à un système passif de refroidissement à l'air ambiant. Ajouter à cela, un tel mécanisme consomme plus d'énergie

qui assure son fonctionnement. Et sans oublier de citer, le danger des réfrigérants sur la nature et l'environnement, tout ceci défavorise d'opter pour un tel système malgré la possibilité d'ajuster sa capacité de réfrigération avec une flexibilité adaptée aux demandes en froid de l'éolienne.

4.2. Refroidissement centralisé :

Généralement, dans les parcs éoliens on dispose de plusieurs machines éoliennes plantées en juxtaposé. Et dans le cadre de réduire les coûts d'installation et les difficultés de maintenance ainsi que d'augmenter la fiabilité des systèmes et l'efficacité économique, on préfère d'utiliser un refroidissement centralisé (Figure 4-2).

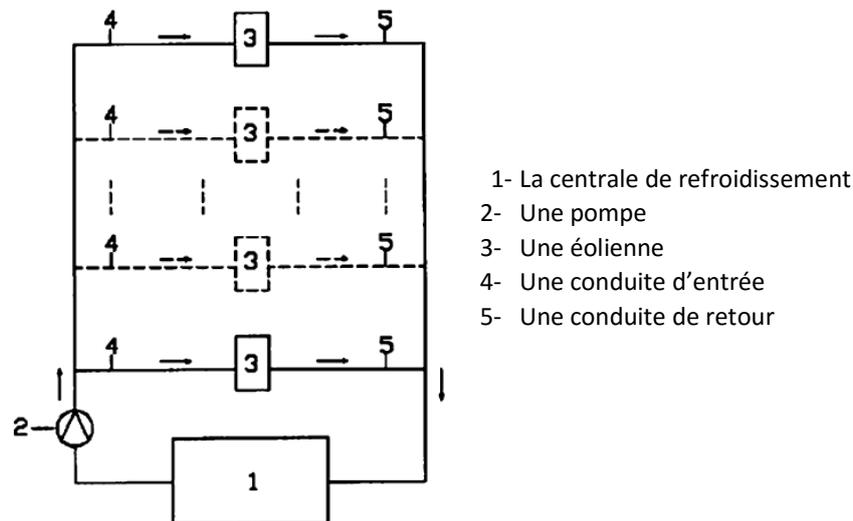


Figure 4-2 : Schéma du système de refroidissement centralisé des éoliennes [12]

En particulier, la capacité unitaire croissante des éoliennes mène à une augmentation dans la production de chaleur durant leur opération. Et l'inconvénient précité du procédé de refroidissement autonome traditionnel sera plus aiguë. Par conséquent, le procédé de refroidissement centralisé est pris en considération. Une centrale de refroidissement d'une capacité centralisé équivalente à toutes les éoliennes est installer dans la ferme.

Pareil avec les éoliennes adoptant la réfrigération à compression de vapeur vue précédemment, le fluide de refroidissement fonctionne de manière séquentielle à travers les échangeurs des composants produisant de la chaleur ; boîte de vitesses, générateur et convertisseur de commande (voir Figure 4-3). Le fluide de refroidissement chauffé est ensuite livré à la centrale de réfrigération de la ferme éolienne à travers les tuyaux de retour afin qu'il soit centralisé et réfrigéré, puis une pompe le refoule à chaque éolienne à travers les conduites d'entrée pour effectuer le prochain cycle de refroidissement.

Dans une application pratique, différents types de refroidisseurs peuvent être sélectionnés pour le système de refroidissement de l'éolienne, selon les exigences en froid de l'aérogénérateur. Les unités de réfrigération sont en mesure d'obtenir une température de refroidissement plus basse par rapport aux refroidisseurs d'air. Lorsqu'une seule unité de réfrigération ne peut suffire aux exigences de refroidissement qui sont modifiées en raison du

climat, de la saison et d'autres facteurs, plusieurs unités de réfrigération peuvent être adoptées et régulées avec souplesse en changeant juste le nombre d'appareils en fonctionnement.

Quant à une centrale éolienne d'une zone géographique à grande échelle avec un grand nombre d'aérogénérateurs, une autre option est de mettre plusieurs unités de réfrigération

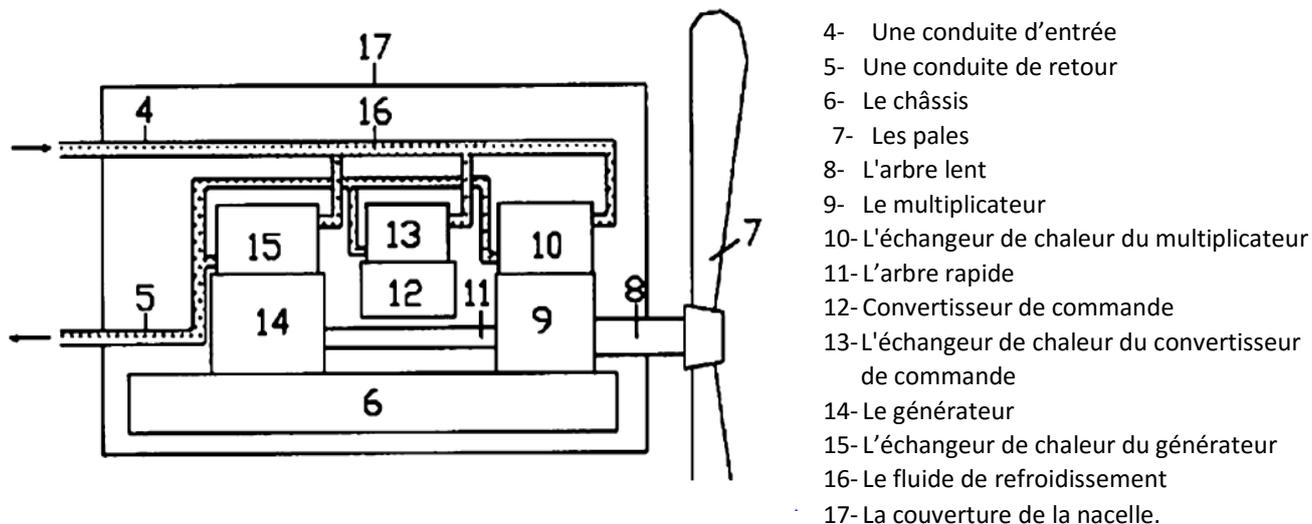


Figure 4-3 : Structure de système de refroidissement centralisé dans la nacelle des éoliennes [12]

centralisées à différents endroits appropriés, en fonction de la situation concrète, afin de mieux satisfaire les exigences en froid et de rationaliser la distribution des lignes de refroidissement en visant à obtenir une grande fiabilité avec un gain économique. Et dans le but de réduire le gaspillage en capacité de refroidissement, il est demandé d'équiper les lignes de tuyauteries avec de bonnes propriétés d'isolation thermique, tels que les revêtements d'isolation.

Les canalisations de transport du fluide de refroidissement peuvent être disposées le long des câbles électriques à l'intérieur du mât de l'éolienne, de manière à éviter l'érosion du sable et de la pluie. Par ailleurs, les articulations de la tuyauterie peuvent également être relié avec des soufflets et des flexibles à l'entrée de la nacelle.

En comparant avec les autres systèmes de refroidissement, la réfrigération centralisée coûte très chère. Cependant, elle offre une capacité de réfrigération énorme, et elle permet une meilleure régulation et adaptation vis-à-vis du besoin de la ferme éolienne en froid. Ainsi en la comparant la méthode précédente d'utilisation d'un cycle à compression de vapeur, cette méthode centralisée simplifie le système de refroidissement à l'intérieur de la nacelle, et réduit son poids. Ce système est plus facile pour la maintenance et plus simple à réguler par rapport aux variations climatiques.

4.3. Réfrigération par jet de vapeur à énergie solaire :

Le refroidissement par jet de vapeur utilise un jet haute pression de vapeur d'eau pour refroidir l'eau ou d'autres milieux liquides. Les utilisations typiques comprennent des sites industriels, où une alimentation de vapeur appropriée existe déjà à d'autres fins ou, historiquement, pour la climatisation des trains de voyageurs qui utilisent la vapeur pour le chauffage. Le refroidissement par jet de vapeur a connu une vague de popularité au cours des

années 1930 pour la climatisation des grands bâtiments. Les cycles de réfrigération d'éjection de vapeur ont ensuite été supplantés par des systèmes utilisant des compresseurs mécaniques.

Les technologies de refroidissement et les solutions mentionnées ci-dessus sont tous animés par l'électricité. Cependant, cette technique réduit la consommation en énergie électrique, tout

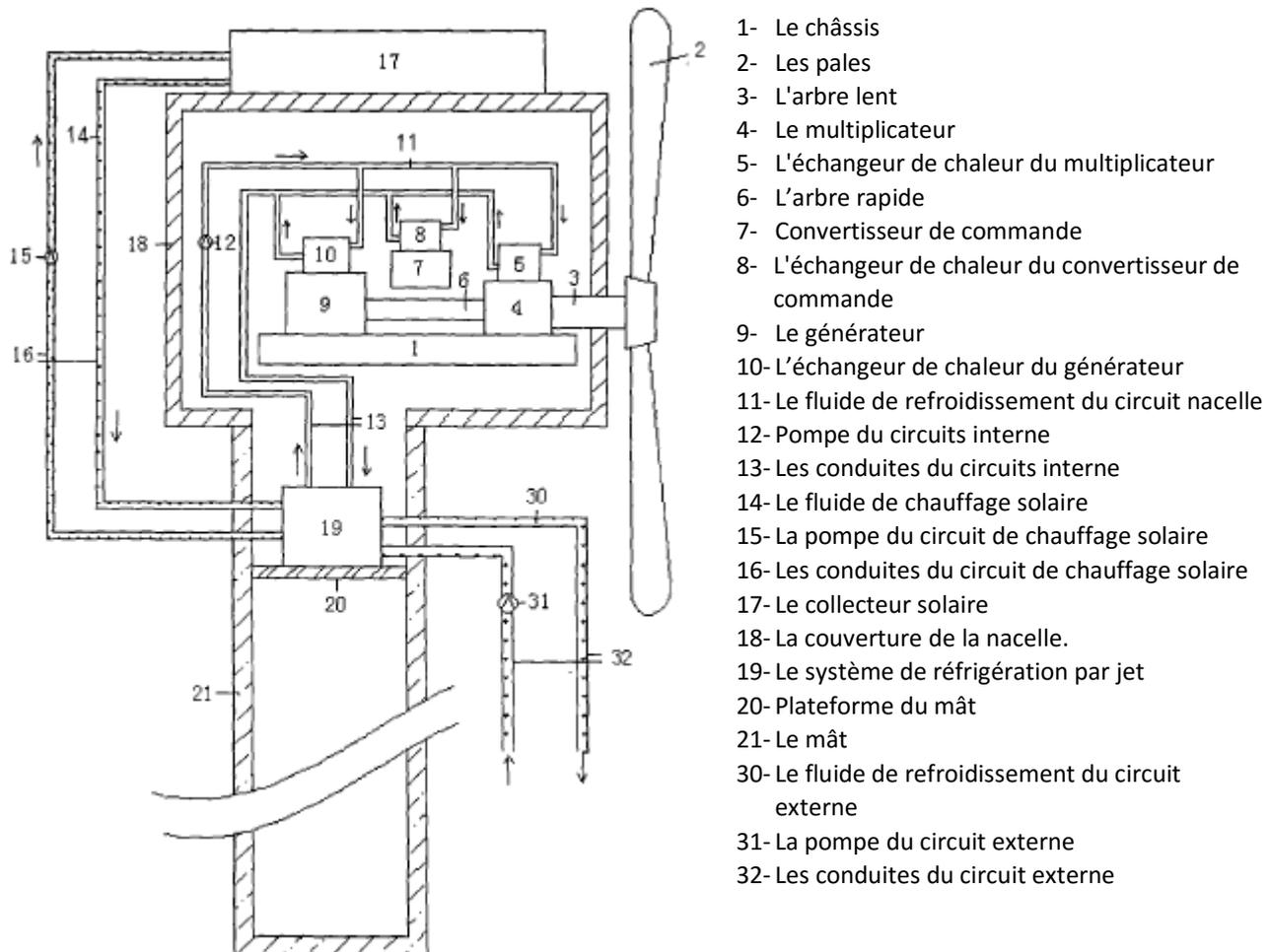


Figure 4-4 : Schéma du système de réfrigération par jet de vapeur à énergie solaire pour les éoliennes [12]

en utilisant l'énergie solaire comme une énergie propre. En fait, la technique actuelle de récupérer l'énergie solaire en chaleur est assez mature. Ce qui permet à la méthode de refroidissement par jet de vapeur à énergie solaire d'être mise en œuvre dans le système de refroidissement de la turbine éolienne.

Comme représenté sur les figures ci-dessous, Une éolienne adoptant un système de réfrigération par jet de vapeur à énergie solaire comprend un capteur solaire thermique posé sur le toit de la nacelle, un moteur de réfrigération à jet, un circuit de refroidissement interne évacuant la chaleur des composants et le circuit de refroidissement externe du condenseur.

Semblable aux systèmes présentés précédemment, pendant le fonctionnement le fluide de refroidissement interne circule de manière séquentielle à travers les échangeurs en éliminant la chaleur produite par le générateur, le multiplicateur et le convertisseur de commande. Le fluide frigorigène chauffé entraîné par une pompe vers l'évaporateur du système de réfrigération afin qu'il soit refroidi. Enfin, le réfrigérant secondaire refroidi est ensuite délivré de nouveau aux

trois échangeurs de chaleur pour absorber la chaleur afin d'assurer le fonctionnement durable et sûr de la turbine éolienne.

Dans le fonctionnement du réfrigérateur à jet, le capteur solaire à basse température convertit l'énergie thermique du soleil en chaleur. Grâce à une pompe, la chaleur est ensuite transportée par le fluide de chauffage vers l'accumulateur où elle sera stockée.

Entre-temps, le réfrigérant absorbe la chaleur dans l'accumulateur et se gazéifie tout en augmentant sa pression. Le réfrigérant est ensuite éjecté à travers les éjecteurs de l'appareil à jet, ce qui provoque une chute de pression près du vide à la pointe de jet. Ainsi, le réfrigérant à basse pression de l'évaporateur est aspiré dans l'appareil à jet en raison de la différence de pression. Le fluide frigorigène mélangé à la vapeur de l'appareil à jet est alors éjecté dans le condenseur et effectue un échange de chaleur avec le fluide de refroidissement circulant dans le condenseur venant du circuit externe.

Le réfrigérant refroidi est manœuvré en deux parties par des tuyaux. L'un des deux est aspiré par une pompe pour être refoulé vers l'accumulateur de chaleur pour terminer le cycle de puissance. Tandis que l'autre partie passe par la vanne de détente vers l'évaporateur en se transformant en vapeur à basse pression. A ce stade, le fluide effectue un échange de chaleur avec le réfrigérant secondaire du cycle de refroidissement interne et ainsi il mettra fin au cycle de réfrigération.

Il est à noter que l'eau de mer ou des eaux souterraines peut être utilisée comme fluide de refroidissement dans le condenseur. Pour éviter l'encrassement dans les conduites et dans le condenseur qui résulte en mauvais effet de refroidissement, un filtre doit être installé à l'entrée du fluide de refroidissement. Dans les zones où l'eau est difficile à atteindre, le fluide de refroidissement peut être remplacé par un autre liquide traité.

Dans l'absence de l'énergie solaire où les conditions de fonctionnement sont anormales dans le cycle de puissance, un dispositif de chauffage auxiliaire peut être utilisé pour chauffer le fluide frigorigène circulant à travers afin de compenser le manque d'énergie dans l'accumulateur de chaleur.

En faisant une comparaison avec les systèmes actuels de refroidissement dans les éoliennes, ce dispositif à jet de vapeur avec l'énergie solaire possède de nombreux avantages. Tels que la réduction de la consommation de puissance, que les pompes de circulation et le chauffage auxiliaire qui ont besoin d'électricité. Ainsi, ce système donne une meilleure performance de refroidissement avec un pouvoir d'obtenir une température inférieure à la température ambiante, ce qui assure un fonctionnement dans des conditions optimales. Le fluide frigorigène dans ce système peut être choisi parmi les substances non-chlorofluorocarbures (sans CFC) qui seront d'une grande aide à la protection de l'environnement.

En outre, puisque ce système de réfrigération a une structure plus simple et plus léger que les autres, ce mérite permettra d'améliorer la propriété totale antifatigue de la nacelle. Ajoutant à ceci, son emplacement dans la nacelle qui lui permettra d'éviter la corrosion provoquée par le sable et la pluie, alors la performance de travail et la durée de vie seront effectivement garanties.

Par conséquent, il peut satisfaire les exigences de travail des éoliennes de haute puissance et il est très efficace et fiable [30].

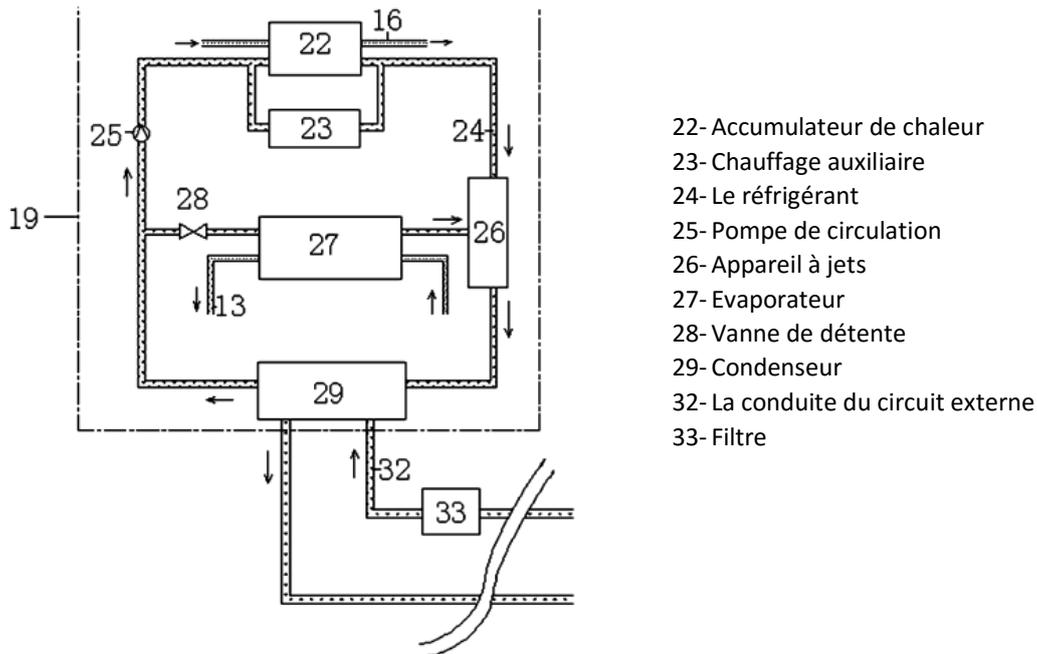


Figure 4-5. Système de réfrigération par jet [12]

4.4. Le refroidissement par caloducs pour le multiplicateur de vitesse :

Les trois solutions mentionnées ci-dessus se concentrent principalement sur la totalité de l'effet de refroidissement de tous les composants produisant de la chaleur. D'autre part, compte tenu de différentes conditions structurelles et les exigences de refroidissement des différents composants ainsi en utilisant des solutions combinatoires correspondantes, on peut améliorer en conséquence l'efficacité économique d'exploitation, qui est aussi une tendance future pour les systèmes de refroidissement de la turbine éolienne. Comme la boîte de vitesses à une structure simple et un espace suffisant pour l'installation, un caloduc par gravité sera la solution

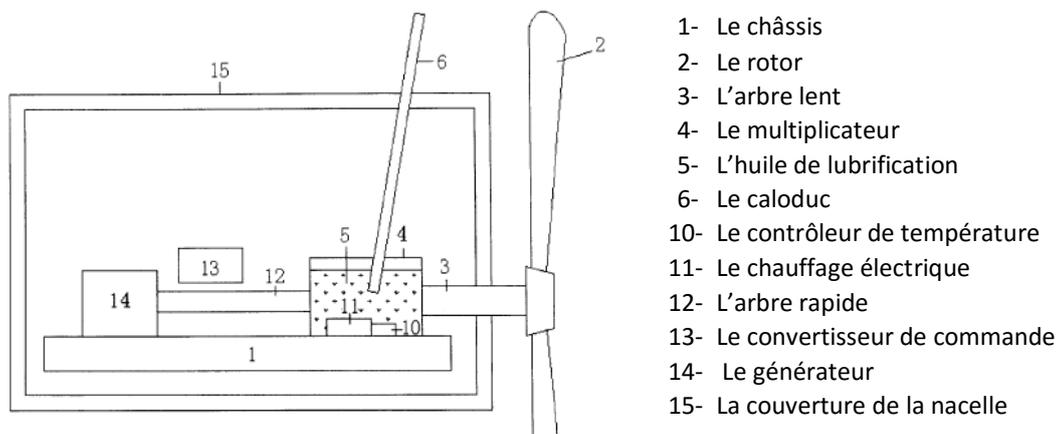
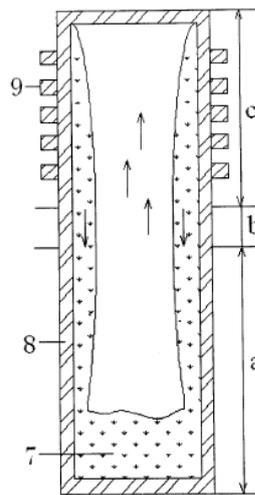


Figure 4-6 : Le schéma d'une éolienne adoptant un refroidissement à caloduc pour le multiplicateur [12]

de refroidissement proposée dans cette section pendant que le générateur et le convertisseur de commande restent avec une adoption d'un système de refroidissement traditionnel.

La présente invention concerne un aérogénérateur adoptant un thermo tube pour refroidir les boîtes de vitesses, qui appartiennent au domaine technique des éoliennes. Le caloduc qui est assisté par la gravité, est utilisé pour refroidir le lubrifiant du multiplicateur.

Le système se compose de caloducs pour le refroidissement du multiplicateur (*Figure 4-6*), un contrôleur de température et un chauffage électrique visant à empêcher le froid extrême de l'huile lubrifiante en hiver. Pendant le fonctionnement de l'éolienne, la chaleur produite par la boîte de vitesses est tout d'abord absorbée par l'huile de lubrification, qui sera délivrée à la zone d'évaporation du caloduc. A ce niveau de la conduite de chaleur, le fluide s'évapore en raison de l'absorption de chaleur. La vapeur monte dans la direction axiale le long du caloduc. En dépassant la zone d'isolation thermique, il libère cette chaleur et se condense dans la zone de condensation à l'extérieur de la nacelle. Enfin, le condensat retourne à la zone d'évaporation à l'aide de la gravité, pour qu'il recommence à nouveau la procédure d'évaporation, et ainsi de suite pour réaliser un refroidissement efficace de la boîte de vitesses.



- 7- Lubrifiant
- 8- La calandre du caloduc
- 9- Ailettes
- a. La zone d'évaporation
- b. La zone d'isolation
- c. La zone de condensation

Figure 4-7 : schéma descriptif du caloduc [12]

En raison de la structure simple du caloduc (*Figure 4-7*), il revient moins cher soit du côté installation ou maintenance. Comme il consomme moins d'énergie à son fonctionnement, le caloduc est considéré un choix potentiel pour le refroidissement.

4.5. Utilisation de la réfrigération magnétique dans une nacelle d'éolienne :

Le climat du Sahara Algérien est caractérisé par ses conditions thermiques extrêmes de très haute température. Ainsi, les éoliennes qui sont installées dans la région d'Adrar sont assujetties à des hautes et fluctuantes températures pendant la journée et les saisons.

Une étude de calcul des distributions de températures par la CFD dans la nacelle est réalisée[31] afin de quantifier les quantités de chaleur dégagées par les différents composants électromécaniques situés dans la nacelle.

Alors, afin d'assurer le bon fonctionnement de l'aérogénérateur, une réfrigération magnétique est proposée afin d'évacuer la charge thermique générée par la nacelle.

Conclusion :

Ce travail présente les différents concepts d'obtention du froid. Après un passage sur l'histoire du froid et de la réfrigération, on a vu les deux grandes familles de refroidissement, les systèmes passifs et les systèmes actifs.

Les méthodes d'obtention du froid par les systèmes passifs sont les premières que l'Homme a utilisé cependant les progrès technologiques de l'autre époque à limiter leur utilisation. Ainsi, ces dispositifs sont moins pratiques et dépendent beaucoup des conditions extérieures, ce qui les rendait plus difficile à être contrôlés selon les besoins en froid.

Ensuite, avec les progrès scientifiques, l'Homme a adapté de nouveaux concepts pour l'obtention du froid. Les systèmes thermodynamiques ont donné vie à plusieurs systèmes de réfrigération artificielle qui utilisaient un réfrigérant circulant à l'aide d'un compresseur.

Cependant, l'utilisation des réfrigérants, CFCs et HCFCs, ont un effet néfaste sur la couche d'ozone ainsi que l'environnement tout en tiers. Par conséquent, les scientifiques ont l'obligation d'innover de nouvelles technologies de réfrigération plus propres. Et parmi ces concepts propres de réfrigération on trouve ; la réfrigération magnétique, la réfrigération thermoélectrique ainsi que le refroidissement passif tel que le rafraîchissement avec la géothermie de surface.

Les systèmes d'obtention du froid par les préceptes passifs, ce sont d'excellentes solutions qui permettent de réduire la consommation énergétique des immeubles. Cependant, leur dépendance des conditions de l'environnement pose des problèmes sur leurs applications ainsi que leurs performances.

Par conséquent, le monde se retourne vers les concepts de réfrigération clean et consommant de l'énergie verte, exemple de la réfrigération solaire à absorption.

Bibliographie

- [1] B.F. Yu*, "Review on research of room temperature magnetic," *International Journal of Refrigeration*, pp. 622-636, 08 April 2003.
- [2] R. Critoph*, "Solid sorption cycles: A short history," *international journal of refrigeration*, pp. 490-493, 2012.
- [3] B. Luis Pérez-Lombard a*, «A review on buildings energy consumption information,» *Energy and Buildings*, p. 394–398, 12 March 2008.
- [4] M. B. Rafat Al-Waked*, «Enhancing performance of wet cooling towers,» *Energy Conversion and Management* 48, p. 2638–2648, 13 June 2007.
- [5] «energieplus,» [En ligne]. Available: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11178>. [Accès le 18 juin 2016].
- [6] A. Badran*, «Performance of cool towers under various climates in Jordan,» *Energy and Buildings* 35, p. 1031–1035, 7 April 2003.
- [7] A. Reyes, «A study of air flow and heat transfer in building-wind tower passive cooling systems applied to arid and semi-arid regions of Mexico,» *Energy and Buildings* 66, p. 211–221, 09 July 2013.
- [8] G. Mihalakakou, «Modelling the earth temperature using multiyear measurements,» *Energy and Buildings*, 19, pp. 1-9, 3 February 1992.
- [9] L. O. *, «A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, p. 4483–4490, 5 July 2011.
- [10] B. D. Mohammed Benhammou*, «Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44, p. 348–355, 15 August 2015.
- [11] M. Benhammou*, "Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate," *Energy Conversion and Management* 91, pp. 1-11, 2015.
- [12] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, USA: WIT Press, 2010.
- [13] C. Xiaohong Yin, «Enhanced-efficiency operating variables selection for vapor compression refrigeration cycle system,» *Computers and Chemical Engineering*, p. 1–14, 05 May 2015.
- [14] T. E. Peder Bengtsson*, «Reducing the global warming impact of a household heat pump dishwasher using hydrocarbon refrigerants,» *Applied Thermal Engineering* 99, p. 1295–1302, 4 February 2016.

-
- [15] J. V. Pecharsky, «The giant magnetocaloric effect,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 267, p. 60–68, 25 March 2003.
- [16] C. Zimm, «Description and Performance of a Near-Room Temperature Magnetic Refrigerator,» *Cryogenic Engineering*, p. 1759-1766, 1998.
- [17] K. A. Gschneidner Jr, «Recent developments in magnetocaloric materials,» *Rep. Prog. Phys.*, vol. 68, p. 1479, juin 2005.
- [18] J. V. Leitão et E. Brück, «Magnetic and structural results on (Mn,Co)₃(Si,P) and (Fe,Co)₃(Si,P) alloys,» *Results Phys.*, vol. 4, p. 31-32, 2014.
- [19] K. Nielsen, «Review on numerical modeling of active magnetic regenerators for room temperature applications,» *Int. J. Refrig.*, vol. 34, p. 603-616, mai 2011.
- [20] B. Yu, « A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010,» *Inc J. Refrig* 33, p. 1029-1060, septembre 2010.
- [21] O. Sari et M. Balli, «From conventional to magnetic refrigerator technology,» *Int. J. Refrig.*, vol. 37,, pp. 8-15, , Janvier 2014.
- [22] O. Dieng, « Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and airconditioning purposes and recent developments in solar technology,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5, pp. 313-342, 2001.
- [23] F. Lemmini, «Experimentation of an adsorptive solar refrigerator in Rabat,» *FIER*, 2002.
- [24] G. ANIES, Modélisation, simulation dynamique, validation expérimentale et optimisation énergétique d'une unité de rafraîchissement solaire par absorption, L'Université de Pau et des Pays de l'Adour: THESE DOCTORAT , 2011.
- [25] J. CASTING-LASVIGNOTTES, «Aspects thermodynamiques et technico-économiques des systèmes a absorption liquide,» Paris, 2001.
- [26] S. Fan, «Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, pp. 1758-1775, 2007.
- [27] C. S., «Ejectors : Application in refrigeration technology,» *Renewable and Sustainable Energy*, pp. 129-155, 2004.
- [28] W. e. I.Eames, «A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator,» *Int J Refrig*, pp. 378-386, 1995.
- [29] M. OUZZAN, Z. Aidoun, «The effect of operating conditions on the performance of a supersonic ejector for refrigeration,» *International Journal of Refrigeration*, pp. 974-984, 2004.
- [30] h. Il Zhoudong, "Wind power generator cooled by solar injection". Chine Patent CN101392729 A, 25 mars 2009.

-
- [31] A. SMAILI and M. A. MAHDI., «On Clean Cooling Systems for Wind Turbine Nacelle operating in Hot Climate,» International Conference on Clean Cooling Technologies in the ME NA Regions, Bou Smail, W. Tipaza, 5-6 October 2015.
- [32] M. N. BAHADOR, «AN IMPROVED DESIGN OF WIND TOWERS FOR NATURAL VENTILATION AND PASSIVE COOLING,» *Solar Energy Vol. 35, No. 2*, pp. 119-129, 1985.
- [33] Q. Recour, «THÈSE Doctorat Étude des propriétés structurales, magnétiques et magnéto caloriques de Mn_3Sn_2 et ses dérivés,» Université de Lorraine, Lorraine, 2012.
- [34] J. R. Afef Leb ouc, «Réfrigération magnétique Etat de l'art et développements récents,» *SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE EF-EPF-MGE ENS CACHAN, FRANCE*, pp. 8-10, JUILLET 2014.
- [35] F. Allab, THESE Doctorat ETUDE ET CONCEPTION D'UN DISPOSITIF DEREFRIGERATION MAGNETIQUE BASE SUR L'EFFET MAGNETOCALORIQUE GEANT, GRENOBLE, 2008.
- [36] L. Afef, A. Farid, F. J. Marc et Y. J. Paul, «Réfrigération magnétique,» *Techniques de l'ingénieur*, 2005.
- [37] O zbolt, «Electrocaloric refrigeration: Thermodynamics, state of the art and future perspectives,» *international journal of refrigeration*, vol. 40, pp. 174 -188, 19 November 2014.
- [38] K. C. N. Xiaolin Wang, «Experimental investigation of an adsorption desalination plant using low-temperature waste heat,» *Applied Thermal Engineering 25*, p. 2780–2789, 2005.