

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université Ain Témouchent Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de Technologie

Département de Génie Mécanique



Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : **Technologie**

Filière : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Énergétique**

Thème

Analyse énergétique d'un nouveau système de la production de froid

Présenté Par :

- ❖ MAZARI Ali Hamza
- ❖ MAMMAR Mohamed Essedik

Devant le jury composé de :

Dr. Bounif Abdelhamid	U.B.B (Ain Témouchent)	Président
Dr. Bouafia Farida	U.B.B (Ain Témouchent)	Examineur
Dr. Nehari Tayeb	U.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant
Dr. Hadjadj Mohammed	U.B.B (Ain Témouchent)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la sante et la volonté, la patience et le courage durant toutes ces années d'études, d'avoir nous guider et aider pour achever ce travail après tant d'efforts déployés durant ces années.

Je voudrais dans un premier temps remercier Mr NEHARI Tayeb pour sa qualité d'encadrement exceptionnelle et sa patience et disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Merci d'avance aux membres du jury ; qui nous ont honoré de leurs participations et attentions portées à notre mémoire de fin d'études.

Nous souhaitons également exprimer notre sincère reconnaissance envers nos parents pour leur apport, leur soutien et leur patience.

Nos remerciements vont également vers tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail avec générosités et un égard exemplaire.

Dédicace

Je dédie humblement ce travail :

A l'âme de notre mère **Mazari Yamina** décédée et qui n'a pas quitté nos cœurs, nous espérons qu'elle est fière de nous, j'espère que là où elle est, elle sentira plus de bonheur et de paix ... pais à son âme ... ربي يرحمها برحمته الواسعة

A l'Homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : **Mon cher père.**

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : **Ma mère**
ربي يبارك فيها.

A mes **deux petits frères Khaled et Abderrahmane**, en témoignage de la fraternité, qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A **mes oncles et mes tantes**. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

A mes chers amis **Miloud, Aymen, Ghaouti, Hsm, Rayen , Razike , Hamido, Abdelhadi ,Oussama, Soheir** et les autres Et précisément mes cousins **Yacine**
Et **Bilal Et Mosaab .**

A mes collègues de promotion **Génie Mécanique énergétique 2023/2024.**

Enfin A mon collègue : **Hamza** à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis **Merci.**

Mammar Mohamed Essedik

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers :

A mes chers parents qui tiennent une place immense dans mon cœur.

Papa, tu es une vraie école de la vie, je ne cesse d'apprendre tous les jours avec toi.

Maman, Ta présence est manquée, mais ton esprit vit à travers chaque page que j'écris et chaque défi que je surmonte. Cette œuvre est le fruit de ton amour et de ton enseignement, un témoignage éternel de l'impact indélébile que tu as laissé dans mon cœur et dans ma vie. *رحمك الله يا غالية*

A mes très chères sœurs : Fatima Zohra et Narimen qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mon frère Miloud et a tous les membres de la famille MAZARI

Mon binôme, Mon frère Sedik et un merci particulier à tous mes chères collègues avec lesquels j'ai passé cinq années inoubliables et sans oublier mes chers amis qui ont partagé les moments de stress et de joie, À ceux qui ont ri avec moi et m'ont soutenu dans les épreuves,

C'est grâce à vous que je suis ce que je suis maintenant. Je ne

Pourrais vous remercier assez...que Dieu vous protège.

Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

MAZARI Ali Hamza

Résumé

Dans le domaine alimentaire, la réfrigération occupe une place importante, car elle permet de conserver les aliments et les différentes denrées, prolongeant ainsi leur durée de conservation. Pour ce faire, on utilise généralement des installations telles que les chambres froides ou les entrepôts frigorifiques.

Dans le cadre de notre travail, nous avons d'abord examiné plusieurs travaux antérieurs provenant de diverses sources (locales et étrangères), ainsi que de nombreuses recherches scientifiques sur ce sujet. Nous avons également consulté de nombreux sites Internet pour collecter suffisamment d'informations et de références afin de couvrir tous les aspects liés les systèmes modernes utilisés pour générer du froid.

Dans notre travail nous avons entamé notre conversation en discutant de sur le froid en général, l'histoire de l'émergence de la technologie du froid au XXe siècle et Les scientifiques éminents qui se sont penchés sur la production de froid, pendant le deuxième chapitre on a parlé sur la thermodynamique, chambres froides et les machines frigorifiques d'une manière générale, au cours du troisième nous avons présenté les énergies renouvelables courantes et nous avons ensuite étudié un nouveau système hybride (photovoltaïque-éolien) pour alimenter une entrepôt frigorifique dans une zone saharienne, nous avons ensuite proposé six liquides de refroidissement (fréons) spécifiques que nous avons soumis aux mêmes conditions afin d'évaluer, déterminer et comparer leurs performances grâce à l'aide du logiciel appelé Solkane 8.0.

Mots clés : énergie renouvelable, thermodynamique, froide, liquides de refroidissement, réfrigération, fréons, système hybride.

Abstract

In the field of food, réfrigération plays an important role as it allows us to preserve food and various commodities, thereby extending their shelf life. To achieve this, we typically use facilities such as cold rooms or refrigerated warehouses.

In the context of our work, we first reviewed several previous studies from various sources (local and foreign), as well as numerous scientific research papers on this topic. We also consulted many websites to gather sufficient information and references to cover all aspects related to modern systems used for generating cold.

In our work, we began our conversation by discussing cold in general, the history of the emergence of refrigeration technology in the 20th century, and eminent scientists who focused on cold production. In the second chapter, we talked about thermodynamics, cold rooms, and refrigeration machines in a general sense. In the third chapter, we presented common renewable energies and then studied a new hybrid system (photovoltaic-wind) to power a refrigerated warehouse in a Saharan region. We then proposed six specific refrigerants that we subjected to the same conditions to evaluate, determine, and compare their performance using the software called Solkane 8.0.

Keywords : renewable energy, thermodynamics, cold room, cooling, hybrid system.

ملخص

في مجال الأغذية، يحتل التبريد مكانة مهمة حيث يتيح لنا الحفاظ على الأطعمة والمواد المختلفة التي تحتاج للبرودة، مما يعزز من مدة صلاحيتها. ولتحقيق ذلك، نستخدم عادة منشآت مثل الغرف الباردة ومستودعات التبريد.

في إطار عملنا، قمنا أولاً بمراجعة العديد من الأبحاث السابقة من مصادر متنوعة (محلية وأجنبية)، بالإضافة إلى العديد من الدراسات العلمية حول هذا الموضوع. كما استعنا بالعديد من المواقع على الإنترنت لجمع معلومات ومراجع كافية لتغطية جميع الجوانب المتعلقة بالأنظمة الحديثة المستخدمة في توليد البرودة.

في عملنا، بدأنا بمناقشة البرودة بشكل عام، وتاريخ ظهور تكنولوجيا التبريد في القرن العشرين، والعلماء البارزين الذين اهتموا بإنتاج البرودة. في الفصل الثاني، تحدثنا عن الديناميكية الحرارية والغرف الباردة وأجهزة التبريد بشكل عام. وفي الفصل الثالث، قدمنا الطاقات المتجددة الشائعة، ثم درسنا نظاماً هجيناً جديداً (الطاقة الشمسية الكهروضوئية والرياح) لتشغيل مستودع تبريد في منطقة صحراوية. ثم قدمنا ستة سائل تبريد محددة تمت تعريضها لنفس الظروف لتقييم أدائها باستخدام برنامج

Solkane 8.0.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة , الديناميكية الحرارية , الغرفة الباردة , التبريد , النظام الهجين

Nomenclature

R	Resistance thermique	W/m ² .k
T	Température	°C
H	Enthalpies massique	Kj/kg
S	Entropies	j/kg
W	Travail	j/kg
V	Volume spécifique	m ³ /kg
P	Pression	K.Pascal
Cp	Capacité calorifique à P=cste,	J/kg.K
Cv	Capacité calorifique à V=cste,	J/kg.K
Tcon	Température de condensateur	°K
Tévap	Température d'évaporateur	°K
hi	Coefficient de convection intérieur	
he	Coefficient de convection extérieur	
λ	Conductivité thermique	W/m.K
k	Coefficient de transmission thermique	W/m
Φ	Flux de chaleur	W
Wc	Travail massique du compresseur	Kj/kg

Abréviations

Abréviations	Désignation
HP	Haute pression
BP	Base pression
COP	Coefficient de performance
EER	coefficient d'efficacité frigorifique
ODP	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone
Comp	Compresseur
GWP	Potentiel de réchauffement climatique
HCFC	HydroChloroFluoroCarbon
HC	Hydrocarbon
Th	Thermomètre

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Abstracts	
Table de matière	
Liste des figures	
Liste de tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1 Introduction	2
I.2 Histoire des techniques du froid	2
I.2.1 Les premières machines	2
I.3 Le Froid avant les machines frigorifiques	4
I.3.1. Glace Naturelle	4
I.3.2 Mélanges réfrigérants	5
I.4 Les précurseurs et les savants de la production froide	5
I.4.1 Pierre-Simon de Laplace	5
I.4.1.1. Biographie	6
I.4.1.2 L'ascension	6

I.4.1.3	Carrière politique	9
I.4.1.4	Contributions scientifiques	11
I.4.2	Pierre Louis Dulong	15
I.4.2.1	Biographie	15
I.4.2.2	Travaux	16
I.4.2.3	: Hommages	17
I.4.3	Nicolas Clément (chimiste)	17
I.4.3.1	Biographie	17
I.4.4	Victor Regnault	18
I.4.4.1.	Biographie	18
I.4.4.2	Hommage	19

Chapitre II : Généralités sur les chambres froides et les machines frigorifiques

II.1	Introduction	21
II.2	La thermodynamique	21
II.2.1	Les principes de la thermodynamique	22
II.2.2	Laplace en thermodynamique	23
II.2.3	Les transformations thermodynamiques	24
II.2.4	Les réactions d'une transformation thermodynamique	25
II.3	Généralités sur les chambres froides	25
II.3.1	Les types de chambres froides	25

II.3.2 Avantages et inconvénients d'une chambre froide	26
II.3.2.1 Avantages	26
II.3.2.2 Inconvénients	27
II.3.3 Les normes d'hygiène d'une chambre froid	27
II.3.4 Quelques bonnes pratiques d'hygiène	27
II.4 Les machines frigorifiques	28
II.3.2.1 Principe de fonctionnement	28
II.3.2.2 Types de machines frigorifiques	29
II.6 Les applications industrielles des froids	29
II.7 Les moyens de production de froid	30
II.8 Le cycle frigorifique	31
II.9 Le coefficient de performance	32
II.10 Les fluides frigorigènes	33
II.10.1 Les différentes catégories de fluide frigorigène	34
II.10.2 Critère de choix d'un fluide frigorigène	34
II.11 L'isolation dans système de froid	34
II.11.1 Rôle de l'isolation thermique	35
II.11.2 Matériaux isolants	35
II.11.3 Avantages de l'isolation thermique	35

**Chapitre III : Caractéristiques du système hybride
photovoltaïque-éolien**

III.1 Introduction	37
III.2 Les énergies renouvelables	37
III.3 Les sources d'énergie renouvelables courantes	38
III.4 Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie	39
III.5 La relation entre l'énergie renouvelable et le froid	40
III.6 Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides	40
III.7 Principe de fonctionnement de système hybride étudié	42
III.8 Composants d'un système hybride	43
III.8.1 Système photovoltaïque	43
III.8.1.1 Avantages et inconvénients d'un système PV	44
III.8.2 Système éolien	45
III.8.2.1 Les types d'éoliennes	45
III.8.2.2 Composants d'un système éolien	46
III.8.2.4 Avantages et inconvénients d'un système éolien	46
III.8.3 Réseau électrique	47
III.8.3.1 Avantages et inconvénients de réseau électrique Sonalgaz	47
III.9 Conclusion	48

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction	50
-------------------------	----

IV.2 Objectif de travail	50
IV.3 Présentation de région d'étude	50
IV.4 Présentation du logiciel SOLKANE 8	51
IV.5 Comment sélectionner les fluides frigorigènes	51
IV.6 Les liquides frigorigènes	52
IV.7 Présentation des résultats de calcul du logiciel	53
IV.8 Présentation des paramètres qui affiche les résultats	54
IV.9 Analyse énergétique des fréons	54
IV.9 l'influence sur Cop	63
IV.10 Remarque et comparaison	63
IV.11 Conclusion	64

Conclusion générale

Conclusion générale	66
---------------------------	----

Liste des figures

CHAPITRE II : Généralités sur les chambres froides et les machines frigorifiques

Figure II.1 : chambre froide alimentaire.

Figure II.2 : La production de neige artificielle.

Figure II.3 : Cycle frigorifique.

Figure II.4 : Un ensemble des fréons frigorifiques.

CHAPITRE III : Caractéristique du système hybride photovoltaïque-éolien

Figure III.1 : Panneau solaire

Figure III.2 : Centrale de l'énergie biomasse

Figure III.3 : Schéma générale d'une installation hybride éolien-photovoltaïque avec système de stockage

Figure III.4 : Principe de fonctionnement système hybride

Figure III.5 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Figure III.6 : Les composantes de l'aérogénérateur

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1 : les caractéristiques thermo physique du fluide choisis.

Figure IV.2 : Liste des fluides frigorigènes.

Figure IV.3 : les caractéristiques utilisées.

Figure IV.4 : les résultats affichés pour le réfrigérant R22.

Figure IV.5 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R22.

Figure IV.6 : diagramme P-H du cycle simple R22.

Figure IV.7 : les résultats affichés pour le réfrigérant R134a.

Figure IV.8 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R134a.

Figure IV.9 : diagramme P-H du cycle simple R134a.

Figure IV.10 : les résultats affichés pour le réfrigérant R404a.

Figure IV.11 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R404a.

Figure IV.12 : diagramme P-H du cycle simple R404a.

Figure IV.13 : les résultats affichés pour le réfrigérant R32.

Figure IV.14 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R32.

Figure IV.15 : diagramme P-H du cycle simple R32.

Figure IV.16 : les résultats affichés pour le réfrigérant R22.

Figure IV.17 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R227.

Figure IV.18 : diagramme P-H du cycle simple R227.

Figure IV.19 : les résultats affichés pour le réfrigérant R22.

Figure IV.20 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R152a.

Figure IV.21 : diagramme P-H du cycle simple R152a.

Liste des tableaux

CHAPITRE II : Généralités sur les chambres froides et les machines frigorifique

Tableau 1 : transformations thermodynamiques.

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1 : ODP et GWP des liquides frigorifiques.

Tableau IV.2 : Les abréviations du tableau de paramètres.

Tableau IV.3 : Résultats sur les performances des fluides frigorigènes examinés et leur facteur d'impact sur la couche d'ozone (ODP) et de réchauffement climatique (GWP).

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

L'histoire de l'humanité est jalonnée par des avancées technologiques majeures, dont certaines ont eu un impact révolutionnaire sur notre quotidien. Parmi ces avancées, la maîtrise de la réfrigération occupe une place de choix, permettant de préserver des denrées périssables, de garantir la qualité des produits pharmaceutiques et de créer des environnements de travail optimaux dans divers domaines industriels.

Au cœur de cette révolution se trouvent les "savants du froid", des chercheurs et des inventeurs qui ont consacré leur vie à comprendre les principes de la thermodynamique et à développer des technologies innovantes pour contrôler les températures. Leurs contributions ont pavé la voie à une myriade d'applications, des chambres froides industrielles aux systèmes de climatisation domestique.

Dans cette optique, ce mémoire se propose d'explorer en profondeur les différents aspects de la réfrigération moderne. Dans un premier chapitre, nous plongerons dans une recherche bibliographique approfondie sur les pionniers de la réfrigération, mettant en lumière leurs découvertes et leurs contributions fondamentales.

Le deuxième chapitre explore en profondeur les fondements thermodynamiques essentiels, les concepts de chambre froide, le fonctionnement des machines frigorifiques, en évaluant leurs avantages et leurs inconvénients respectifs, ainsi que les nombreuses applications pratiques du froid dans notre vie quotidienne. De plus, nous aborderons les fluides frigorigènes, les cycles frigorifiques et l'importance cruciale de l'isolation thermique dans la conception et le fonctionnement efficaces des systèmes de réfrigération,

Dans le troisième chapitre, nous explorerons les énergies renouvelables comme alternative prometteuse pour l'alimentation des systèmes de réfrigération. Nous présenterons un nouveau système novateur d'alimentation de chambre froide, nommé "Système Hybride", combinant l'énergie photovoltaïque et éolienne pour une solution durable, renouvelable et écologique.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous procéderons à une analyse énergétique approfondie des liquides frigorigènes disponibles sur le marché. L'objectif sera de déterminer quel fluide est le plus compatible et performant pour une chambre froide alimentée par un système hybride, en mettant en évidence les critères de sélection essentiels pour maximiser l'efficacité énergétique.

À travers cette étude, notre objectif principal était d'appliquer un système hybride combinant l'énergie solaire et éolienne pour la production de froid, notamment pour les propriétaires de chambres froides confrontés aux coûts élevés de l'électricité, et de choisir un meilleur liquide frigorigène compatible avec ce type d'entrepôt.

Chapitre I

Recherche

bibliographique

I.1 Introduction :

Dans un monde en constante évolution, la maîtrise des technologies liées au froid revêt une importance croissante. Que ce soit dans le domaine de la conservation des denrées alimentaires, de la cryogénie industrielle, de la climatisation ou encore de la recherche spatiale, les applications du froid sont vastes et diversifiées. La recherche bibliographique sur ce sujet constitue donc une étape cruciale dans la compréhension et le développement de ces technologies.

Ce chapitre se concentre sur l'exploration des travaux antérieurs et des avancées récentes dans le domaine du froid, en mettant l'accent sur les aspects théoriques, les méthodes expérimentales et les applications pratiques. En examinant de près la littérature existante, nous chercherons à identifier les tendances actuelles, les lacunes de connaissances et les défis à relever.

I.2 Histoire des techniques du froid :

I.2.1 Les premières machines :

En 1834, Jacob Perkins, américain, crée une machine à compression de vapeur (cycle fermé) à l'éthyle ether comme fluide frigorigène. Un unique prototype fut réalisé. L'écossais James Harrison, une vingtaine d'années plus tard, brevete une idée très similaire (avec le même fluide frigorigène : l'éthyle éther). Ce liquide présente des propriétés inflammables et toxiques, mais il sera le seul fluide employé dans les quelques machines à compression construites jusqu'au début du siècle. Au cours de cette période, deux autres méthodes seront employées pour produire du froid artificiel : les cycles à air et les cycles à absorption.

L'américain John Gorrie, médecin en Floride, a utilisé le cycle à air pour la première fois, dans le but de fabriquer de la glace afin d'améliorer le confort de ses patients. En 1844, la première machine a été construite sur ce principe. En raison des préjugés religieux de l'époque (« Seul Dieu était capable de faire de la glace et de la neige »), l'invention fut dissimulée. Néanmoins, Gorrie reçut un brevet américain en 1851. La machine à cycle à air fut un grand succès à la fin du siècle, même si ses performances énergétiques étaient médiocres. Cela s'applique notamment aux navires pour des raisons évidentes de sécurité. Par la suite, l'emploi de ce cycle s'est peu à peu réduit et est actuellement restreint.

En 1859, le français Ferdinand Carré a créé la machine à absorption en utilisant l'ammoniac comme fluide frigorigène. Cette machine connut un succès rapide, notamment aux États-Unis. Jusqu'en 1875, cette machine a largement dominé les autres types de machines. L'allemand Edmund Altenkirch développa la théorie des systèmes à absorption bien plus tard, en 1913.

Les machines à compression ne furent réellement industrialisées qu'à partir de 1870 lorsque des fluides frigorigènes moins dangereux que l'éthyle éther furent proposés : dioxyde de soufre (SO₂), chlorure de méthylène, dioxyde de carbone (CO₂). Il fut largement employé dans les transports maritimes à partir de 1890 en remplacement des machines à air.

La deuxième moitié du XIXe siècle a été marquée par les pionniers de la réfrigération qui ont réussi à concevoir et à utiliser les premiers équipements... sans pour autant avoir une compréhension scientifique des phénomènes dont ces machines étaient le siège.

En d'autres termes, l'apparition de la technologie de la production du froid (par technologie, nous entendons l'utilisation d'outils intellectuels et de théories pour concevoir et fabriquer des machines) peut être attribuée au début du 20^{ème} siècle : la domination des machines à compression de fluides liquéfiables était devenue réelle et la production artificielle augmentait de plus en plus. Cependant, il faut attendre 1915 pour que dans le pays le plus moderne de l'époque, les États-Unis, la production de glace artificielle dépasse la production naturelle de glace, soit environ 25 Mt/an pour chaque espèce.

La prédominance de l'ammoniac dans les machines à compression dura jusqu'en 1930. À cette date, trois chercheurs mettent au point des fluides frigorigènes de types hydrocarbures halogénés dont le nom commercial sera Fréon. Thomas Migley, Albert Leon Henne et Robert R. McNary travaillaient alors dans les laboratoires de la société Frigidaire à Dayton (Ohio). La production industrielle de R12 (CCl₂F₂) en 1931 puis celle du R11, R114, R113, R22 en 1936 fut réalisée par la société Kinetic Chemical Inc à Wilmington (Delaware). Ces fluides frigorigènes dérivés du méthane et de l'éthane dominèrent tous les secteurs de la réfrigération pendant 40 années, alors que l'ammoniac restait le fluide adapté aux machines industrielles de grosse puissance.

Les industriels et les utilisateurs furent contraints en 1973 par la crise pétrolière de prendre en considération les problèmes énergétiques. En seulement 20 ans, la technologie du froid a connu des progrès significatifs :

- Perfectionnement des compresseurs, en particulier des compresseurs hermétiques ;
- Introduction de nouveaux types de compresseurs tels que les compresseurs SCROLL ;
- Amélioration des performances des échangeurs en utilisant des tubes, des ailettes et des plaques innovantes.
- Le monde du froid est bouleversé par la découverte d'un trou d'ozone au-dessus du continent antarctique en 1983 et la mise en cause des fluides de type hydrocarbures halogénés, notamment chlorofluorocarbures (CFC).

Le protocole de Montréal (1987) établit des règles internationales concernant la réduction et l'arrêt de la production des CFC. Suite au protocole de Kyoto en 1992, la diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES) tels que les HFC, HCFC, fluides utilisés dans les équipements de production de froid est mise en œuvre et conduit à la mise en œuvre de directives européennes contraignantes (F Gas).

I.3 Le Froid avant les machines frigorifiques :

I.3.1. Glace Naturelle :

Très vite, l'homme des pays tempérés a compris que les denrées périssables pouvaient être conservées dans des conditions bien meilleures l'hiver que l'été. Le « froid naturel » a été utilisé depuis très loin et pendant une période très longue, car au début du 20^{ème} siècle, le marché de la glace naturelle était encore plus important que celui de la glace artificielle. La glace produite de manière naturelle, sans l'aide de machines, provenait soit de régions froides et était transportée sur de longues distances, soit de pièces d'eau des régions tempérées gelées par le froid hivernal. Il fallait préserver cette glace dans des bâtiments spécifiques appelés « glaciers » dont les parois devaient être isolantes thermiquement. • que la production soit toujours naturelle, mais à l'initiative de l'homme, lorsque cela était envisageable. De cette manière, dans les pays où le ciel est très clair, il a été possible de fabriquer de la glace dans des bassins largement ouverts vers le ciel. Dans certaines conditions

atmosphériques, le rayonnement thermique de l'eau permettait un refroidissement adéquat pour créer de la glace.

I.3.2 Mélanges réfrigérants :

Il a été constaté, probablement par hasard, que la présence de certains sels dans l'eau réduisait considérablement la température de la solution obtenue. Le premier à mentionner l'utilisation de tels mélanges en Inde au IV^e siècle semble être l'écrivain arabe Ibn Abi Usaibia. Le médecin italien Zimara, à Padoue (1530) et le médecin espagnol Blas Villafranca, à Rome (1550), mentionnent l'utilisation du salpêtre pour refroidir l'eau. Par la suite, il a été constaté que la combinaison de neige et de sels permettait d'atteindre des températures encore plus basses. Battista Porta (1589) a rapporté ces phénomènes et Tancredo (1607).

I.4 Les précurseurs et les savants de la production froide :

I.4.1 Pierre-Simon de Laplace :

Pierre-Simon Laplace (né le 23 mars 1749 à Beaumont-en-Auge et mort le 5 mars 1827 à Paris) est un mathématicien, astronome, physicien et homme politique français.

Laplace fait partie des grands savants de la période napoléonienne. Il a fait des avancées essentielles dans divers domaines des mathématiques, de l'astronomie et de la théorie des probabilités. Il fut l'un des scientifiques les plus influents de son époque, en particulier grâce à son engagement en faveur du déterminisme.

Il a joué un rôle crucial dans le développement de l'astronomie mathématique en reprenant et en étendant les travaux de ses prédécesseurs dans son *Traité de Mécanique céleste*³ (1799-1825). Cet ouvrage important, en cinq volumes, a révolutionné l'approche géométrique de la mécanique développée par Newton en une approche basée sur l'analyse mathématique.

En 1799, il devient sous le consulat ministre de l'Intérieur. Ancien élève de Napoléon Ier en 1785 à l'âge de 16 ans pour un examen, il est nommé comte d'Empire en 1808, après avoir été empereur. Il est nommé marquis par Louis XVIII en 1817, à la suite de la restauration des Bourbons.

I.4.1.1. Biographie :

Etude en Normandie :

Fils de Pierre Laplace, assez riche commerçant en cidre, et de Marie-Anne Sochon, fille de cultivateurs, Pierre-Simon Laplace grandit avec une sœur de quatre ans son aînée - sa mère meurt à l'âge de huit ans - au sein d'une famille normande avec laquelle il ne viendra pas à l'adultère, à part une rare correspondance avec son père. Il devient un hôtelier et maire incontesté de Beaumont. Dans cette fonction, il s'occupe de la collecte des impôts locaux et en particulier de la dîme perçue au profit du duc d'Orléans, le grand seigneur de la région.

À cette époque, à la campagne, les hommes bénéficient d'un minimum d'instruction . Pierre-Simon, quant à lui, a l'avantage de pouvoir compter sur son oncle Louis, plus connu sous le nom d'abbé Laplace, un diacre ordonné prêtre qui veut toujours enseigner à son neveu la lecture et les bases de l'arithmétique.

Un centre d'éducation est présent dans la région, le collège de Beaumont n 1, où, grâce à son oncle abbé et à son statut de fils du maire, le jeune garçon est accueilli dès l'âge de sept ans. Il y fait ses études jusqu'en 1765, date à laquelle il intègre le collège des Arts, l'un des trois collèges de l'université de Caen. . Il étudie la philosophie à l'automne 1766, après une année de rhétorique, avec comme professeur Jean Adam (1762-1795) n 2 au collège du Bois, un autre collège de l'université de Caen. Il suit également des cours avec Christophe Gadbled, ardent partisan du modernisme et de la nouvelle science mathématique, titulaire royal du poste rémunérateur d'hydrographe à Caen, mais qui avait conservé ses cours de mathématiques au collège des Arts, en échange de son hébergement par l'université. . Il a aussi comme professeur et examinateur Pierre Le Canu, assistant principal de Gadbled, moderniste convaincu et enseignant de philosophie au collège du Mont à partir de 1769. De 1767 à 1769, il est également répétiteur auprès du collège de Beaumont. Il passe les examens pour la maîtrise ès arts le 1^{er} juin 1769.

I.4.1.2 L'ascension :

Des académies aux portefeuilles ministériels :

Plus importants de l'époque, d'Alembert, dont l'arrivée est annoncée par une lettre de recommandation de Le Canu. Initialement hésitant, d'Alembert est rapidement

persuadé des capacités de Laplace par un essai de quatre pages sur l'inertie. Il est nommé professeur de mathématiques à l'école royale militaire par D'Alembert. Il bénéficie d'un salaire annuel de 1400 livres et vit à l'école militaire en pension complète. De cette manière, sa situation économique est équilibrée et ses responsabilités éducatives, réduites. Il peut s'amuser dans sa chambre ou à la bibliothèque, l'une des plus aisées de France, avec toutes les nouveautés possibles en mathématiques et en physique. Il possède les documents des sociétés scientifiques les plus importantes, telles que celles de Paris, Londres, Berlin, Saint-Petersbourg, Turin et Göttingen. Dans cette bibliothèque qui représente le paradis de Laplace, Lagrange et Euler sont les véritables maîtres de celui-ci.

Le 28 mars 1770, Laplace adresse sa première contribution à l'Académie royale des sciences, un travail sur le calcul des variations que Lagrange vient de perfectionner. Selon le comité d'évaluation, il parvient aux mêmes résultats que Lagrange, mais en utilisant une approche différente, qui est "moins directe et rigoureuse en apparence, mais plus simple et plus agréable". Douze autres lui succéderont avant qu'elle ne soit élue membre adjoint le 31 mars 1773 (en remplacement de Desmarest).

Il reçoit une bourse annuelle de 500 livres de l'Académie en 1775 et une pension de 600 livres en 1776, alors que l'École royale militaire est supprimée et érigée en École de cadets-gentilshommes. Le 25 janvier 1783, il est élu membre associé de l'Académie, deuxième derrière l'abbé Rochon, à la place de pensionnaire vacante à la mort d'Étienne Bézout, mais obtient sa place d'examineur des aspirants et élèves de l'artillerie (4 000 livres par an) n 3 et la nouvelle place d'examineur des élèves ingénieurs-constructeurs de la Marine (1 200 livres par an). Le 23 avril 1785, il est élu pensionnaire de la classe de mécanique de l'Académie (1 200 livres par an) [réf. nécessaire]. Il sera responsable de l'examen de Napoléon Bonaparte à l'automne 1785, alors candidat à l'artillerie.

Il écrit pendant dixsept ans, de 1771 à 1787, une grande partie de son œuvre astronomique.

Il commence sa recherche par un mémoire présenté à l'Académie française en 1773, dans lequel il démontre que les mouvements planétaires sont restés proches de ceux prévus par la théorie de Newton pendant de longues périodes et il vérifie la relation jusqu'aux cubes entre l'excentricité et l'inclinaison des orbites. Différents articles se

concentrent sur différents aspects du calcul intégral, des différences finies, des équations différentielles et de l'astronomie. Toutefois, certaines des découvertes majeures proposées dans ces articles, telles que les correspondances des harmoniques sphériques dans l'espace bidimensionnel, ont déjà été publiées par Adrien-Marie Legendre dans un article adressé à l'Académie en 1783.

Il se marie en 1788 avec Marie Anne Charlotte Courty de Romange : elle est la fille de Jean-Baptiste Courty, audencier en la chancellerie du Parlement de Besançon, et de Marie Hélène Angélique Mollerat¹⁰, et est issue d'une famille de maîtres de forges.

Il entre en 1795 à la chaire de mathématiques du nouvel institut des sciences et des arts, dont il est président en 1812. Il est élu à l'Académie française en 1816. En juin 1817, il dirige une commission pour « étudier le projet d'une nouvelle carte topographique de la France, adaptée à tous les services publics et combinée avec l'opération du cadastre général »¹². Lors de sa création en 1821, il est le premier président de la Société de géographie. Par ailleurs, il rejoint toutes les grandes académies scientifiques d'Europe.

Grâce à son activité académique intense, il influence considérablement les scientifiques de son époque, notamment Adolphe Quetelet et Siméon Denis Poisson. On le compare à un Newton français en raison de son talent naturel et remarquable en mathématiques. Laplace n'a semble-t-il pas fait preuve de modestie, puisque Anders Johan Lexell, en visite à l'Académie des sciences à Paris en 1780-1781, écrit que « Laplace se révèle vraiment le meilleur mathématicien de son temps en France ».

Les comités et commissions concernés par la Convention sont dissociés de l'Académie des sciences et deviennent autonomes, sous la tutelle directe du Comité d'instruction publique. Le comité du nouveau calendrier et la commission des poids et mesures sont parmi ces nouvelles créations. Ce dernier regroupe un grand nombre d'académiciens, dont Borda, l'un de ses fondateurs, mais aussi Delambre, Condorcet, Lagrange, Monge. Au début, Laplace n'y siégeait pas, à la fin, Condorcet et Monge n'y siègent plus, le premier parce qu'il meurt en prison sous la terreur, le second parce qu'il se consacre à l'étude balistiques. Le rôle de Laplace, quant à lui, est crucial dans ce comité chargé de déterminer la nouvelle mesure : Le mètre.

Il est remplacé comme examinateur de l'artillerie par Sylvestre-François Lacroix de 1793 à 1795. Il enseigne à l'école normale de l'an III en tant qu'adjoint de Lagrange et y donne dix leçons du 1er pluviôse au 21 floréal an IV. De 1796 à 1798, il est examinateur permanent de mathématiques à l'École polytechnique pour le recrutement des officiers de l'artillerie, des ingénieurs-constructeurs des vaisseaux et des ingénieurs géographes (Bossut recrute les officiers du génie militaire, les ingénieurs des ponts et chaussées et les ingénieurs des mines). Malgré sa grande influence à l'École polytechnique, Laplace n'y donna jamais d'enseignement.

Lorsque l'Académie royale des sciences est supprimée, il est élu membre résident de la section de mathématiques dans la première classe de l'Institut national le 20 novembre 1795, puis, en 1803, dans la section de géométrie.

Le bureau des longitudes, créé le 25 juin 1795, est le dernier grand apport de la Révolution. Elle accueille les anciens membres de la Commission des Poids et Mesures. Joseph Lakanal, un député de la Convention, interroge Laplace sur les actions de la Convention en matière d'astronomie - Laplace est en effet l'autorité incontestable du pays dans ce domaine et est neutre sur le plan politique -. Dans son projet de loi, Lakanal expose en détail les idées du savant : l'absence d'Académie entraîne la renaissance de la science de l'astronomie par le Bureau. Malgré la continuité du partage des pouvoirs, Laplace est responsable de la création et du fonctionnement du Bureau : un salaire annuel de 8 000 francs et un emploi à long terme lui assurent une stabilité sociale. Le Bureau se transforme rapidement en son propre domaine, il en est immédiatement élu président et a maintenant des contacts avec des députés, des ministres et des cabinets ministériels. Cela lui permet de promouvoir le travail du Bureau et de rechercher des financements pour différents projets. C'est lui qui est devenu le porte-parole du pouvoir de l'astronomie, et même de toutes les sciences. De manière politique, il a atteint le sommet.

I.4.1.3 Carrière politique :

Il est remarquable de constater la rapidité avec laquelle Laplace se rallie au pouvoir en place. Avant le 18 brumaire, Laplace, opposé à la dictature et républicain, comme Lacépède, se rallie sans hésitation au gouvernement consulaire et au pouvoir croissant du général Bonaparte. Laplace renonce à ses valeurs républicaines qui reflètent fidèlement les opinions du parti au pouvoir. Le 18 brumaire, trois jours après le coup

d'État, Laplace est surpris de recevoir la notification de sa nomination au poste de ministre de l'intérieur. Il aurait pour mission d'administrer l'ensemble des départements de France et d'y gérer les problèmes de la société civile, notamment ceux liés au transport, au commerce, à l'industrie, à la santé et à l'éducation. Ce dernier élément a peut-être poussé Bonaparte à désigner un novice en politique. Ce poste n'est occupé que six semaines par Laplace, puis revint à Lucien Bonaparte. Cependant, au cours de cette courte période, il ne reste pas inactif : il ne néglige pas les financements du Bureau des longitudes et la réforme de l'École polytechnique, mais son projet principal est l'introduction du système métrique décimal - qu'il ne pourra pas réaliser - et veille à ce que ses successeurs continuent le travail avec la même énergie. Laplace a rapidement démontré sa médiocrité en tant qu'administrateur dès son premier travail, nous avons immédiatement réalisé que nous étions en erreur. Aucune question n'était abordée de manière constructive par Laplace : il cherchait des nuances de toutes parts, il n'avait que des idées problématiques et enfin il portait l'esprit de l'infiniment petit jusqu'à l'administration.

Laplace perd ainsi sa charge, mais il reste fidèle. Le 3 nivôse an VIII, il entre au Sénat conservateur à la création de ce corps. Il fait une note dans le troisième volume du *Traité de Mécanique céleste* où il écrit « qu'entre toutes les vérités qui y sont contenues, la plus chère à l'auteur est la déclaration faite à sa dévotion envers le médiateur de l'Europe. » Elle est supprimée dans le tirage vendu après la Restauration.

Il est élu, le 18 décembre 1802, membre de la commission chargée de déterminer par une instruction réglementaire les parties à enseigner dans chaque classe de mathématiques lors de la création des lycées. En 1803, il devient vice-président du Sénat et chancelier de ce corps en septembre de la même année. Membre du collège des grands officiers du Grand Orient de France en 1804, il est initié franc-maçon.

Le 30 août 1805, c'est Laplace qui présente au Sénat un rapport sur l'abandon du calendrier républicain pour reprendre le calendrier grégorien. En 1811, il est élu président de la société maternelle Officier de la Légion d'honneur (19 vendémiaires an XII), grand officier (25 prairial suivant), comte de l'Empire le 24 avril 1808, grand-croix de l'Ordre de la Réunion le 3 avril 1813, il vote tout de même, en avril 1814, alors que l'Empire est évident à l'échec, la déchéance de l'empereur, la mise en place d'un gouvernement provisoire²³ et se précipite pour rendre ses services aux Bourbons.

Afin de lui exprimer sa gratitude, Louis XVIII le fait pair de France (4 juin 1814) et fait marquis (ordonnance royale et lettres patentes de 1817).

Le marquis de Laplace reste à l'écart pendant les CentJours et reprend son siège à la chambre haute après la seconde abdication.

Dans le procès du maréchal Ney, il vote pour la peine capitale.

Il est président de la commission de réorganisation de l'école polytechnique en 1816. À la Chambre des pairs, il démontre le même dévouement pour les Bourbons qu'au Sénat de l'Empire : « Un de ses biographes a remarqué, avec raison, que la conclusion de son Exposition du Système du Monde reflétait très précisément les divergences de ses opinions politiques. »

Il est méprisé par ses collègues pour sa conduite en 1814-1815, comme on peut le lire dans les pages de Paul-Louis Courier. L'étude de Laplace est bénéfique pour les nombreuses commissions scientifiques auxquelles il fait partie et explique sans doute la façon dont on a oublié sa polyvalence et son opportunisme politique.

D'après W. W. Rouse Ball²⁵, "Aucun de ses plus fervents admirateurs ne nie que Laplace est présomptueux et égoïste ; sa conduite envers ses bienfaiteurs pendant sa jeunesse et envers ses amis politiques est ingrate et, en outre, il s'approprie les résultats de ceux qui sont relativement inconnus." Trois de ceux qu'il aborde ainsi sont très connus : Adrien-Marie Legendre et Jean-Baptiste Joseph Fourier en France et Thomas Young en Angleterre. Les victimes de cette injustice ne seront jamais oubliées. Par ailleurs, il se montre indépendant sur certaines questions et ne dissimule jamais sa vision des questions de religion, de philosophie ou de science, même si cela n'est pas apprécié des autorités au pouvoir. Après sa mort, et en particulier pour les travaux de ses élèves, Laplace est généreux et une fois, il omet un de ses articles afin qu'un élève puisse avoir le mérite exclusif de la recherche.

I.4.1.4 Contributions scientifiques :

➤ Mécanique céleste :

Les conceptions lagrangiennes sont utilisées par Laplace pour mieux expliquer le mouvement des corps dans la mécanique céleste. Il consacre une grande partie de sa vie à l'étude de l'astronomie mathématique, et son travail culmine en vérifiant la stabilité dynamique du Système solaire en supposant qu'il est composé d'un ensemble de corps rigides qui se meuvent dans le vide. Il est l'un des premiers scientifiques à

poser l'hypothèse de la nébuleuse et l'un des premiers à penser l'existence de trous noirs (que John Michell fut le premier à penser) dans le cadre de la physique classique.

Le Système solaire se serait formé selon l'hypothèse de la nébuleuse d'une masse globulaire de gaz incandescent qui tourne autour d'un axe passant par son centre de masse. Cette masse aurait diminué en refroidissant et quelques anneaux concentriques se seraient détachés de son bord externe. En se refroidissant, ces anneaux se seraient transformés en planètes. Le Soleil serait le centre de la nébuleuse qui, toujours incandescent, continue à émettre de l'énergie. D'après ce point de vue, il est probable que les planètes plus éloignées soient plus âgées que celles plus proches du Soleil. L'idée fondamentale de la théorie, malgré quelques modifications importantes, est encore admise aujourd'hui.

Selon Laplace, il est possible qu'il existe des corps massifs ayant une gravité si élevée que la lumière elle-même ne pourrait pas sortir de leur intérieur, une idée qui est aujourd'hui proche des trous noirs de la cosmologie moderne. Il pense que certaines étoiles de la nébuleuse observées par les télescopes ne font pas partie de la Voie lactée et qu'elles sont elles-mêmes des galaxies.

Entre 1784 et 1787, il rédige plusieurs mémoires avec des résultats remarquables. Celui de 1784 est notamment cité, réédité dans le troisième volume du *Traité de mécanique céleste*, où il définit entièrement l'attraction d'un sphéroïde sur une particule extérieure à lui. Cette introduction en analyse des harmoniques sphériques ou coefficients de Laplace est inoubliable.

En cas de coordonnées (r, μ, ω) et (r', μ', ω') , et si $r' \geq r$, on peut développer la réciproque de leur distance en fonction du rapport de r/r' , et les coefficients respectifs sont les coefficients de Laplace. La raison de leur utilité réside dans le fait que chaque fonction ayant des coordonnées d'un point sur la sphère peut être développée en série.

De 1784 à 1786, il publie un mémoire sur Jupiter et Saturne dans lequel il établit, par séries perturbatrices, que dans des temps très longs, l'action réciproque des deux planètes ne peut jamais avoir un impact significatif sur les excentricités et les inclinaisons de leurs orbites. Il souligne que les spécificités du système de Jupiter découlent du fait que les mouvements moyens de Jupiter et Saturne sont très proches de la durée de vie. La cyclicité du mouvement des deux planètes est également

découverte, avec une estimation d'environ 900 ans. Les deux planètes semblent effectuer des accélérations et des décélérations réciproques. Joseph-Louis Lagrange avait déjà remarqué de telles variations, mais seul Laplace les ajusta à un mouvement cyclique, confirmant ainsi l'idée que le Système solaire a des mouvements non occasionnels même à grande échelle temporelle. Ses recherches sur le mouvement du globe sont développées dans ses deux mémoires de 1788 et de 1789.

Les travaux de Laplace sur les liens entre l'accélération lunaire et les variations séculaires de l'excentricité de l'orbite de la Terre marquent l'année 1787 : cette étude renforce la preuve de la stabilité du Système solaire entier. Il tente, par exemple, d'expliquer comment le mouvement orbital de la Lune est accéléré de manière très légère (négative !) par une variation d'une seconde de la longueur du mois lunaire en trois mille ans, en attribuant la cause à une variation lente de l'excentricité terrestre. En fait, on a montré successivement que de telles accélérations négatives (décélérations) sont causées par l'attraction réciproque qui cherche à synchroniser le mouvement de révolutions et de rotations des corps. En ralentissant sa vitesse orbitale (décélération), la Lune s'éloigne lentement, d'environ 4 cm par an, et inévitablement de la Terre, et la période de rotation de la Terre s'allonge lentement (décélération), d'environ 2 millisecondes par jour par siècle. Pluton/Charon a déjà atteint cette synchronisation de 6 jours, 9 heures, 17 minutes et 36,7 secondes pour la rotation de la planète et la révolution du satellite.

➤ **Physique :**

Laplace est à l'origine de la théorie de l'attraction capillaire (voir Adhésion capillaire), qui admet l'idée avancée par Francis Hauksbee dans les philosophiques Transactions en 1709, selon laquelle le phénomène est causé par une force d'attraction inconsciemment perceptible à une distance raisonnable. L'étude de l'action d'un solide sur un liquide et de l'action réciproque de deux liquides, qu'il développe en partie, est complétée par Carl Friedrich Gauss. En 1862, Lord Kelvin (Sir William Thomson) prouve que, si la matière est moléculaire, les lois de l'attraction peuvent être remplies par les lois de Newton de la gravitation.

Laplace, en 1816, est le premier à expliquer clairement pourquoi la théorie de Newton du mouvement oscillatoire donne une valeur imprécise de la vitesse du son : la vitesse effective est plus élevée que celle calculée par Newton, en raison de la chaleur pr

oduite par la compression imprévue de l'air, qui augmente l'élasticité et donc la vitesse du son transmis.

En physique pratique, les travaux de Laplace ne sont que ceux menés avec Antoine Lavoisier entre 1782 et 1784 sur la chaleur massique de divers corps.

Son nom est donné à la loi sur les transformations adiabatiques des gaz en thermodynamique.

➤ **Mathématiques :**

Parmi les petites découvertes de Laplace en mathématiques pures, on peut citer sa discussion (avant Alexandre-Théophile Vandermonde) de la théorie générale des déterminants en 1772 : sa preuve que toute équation paire doit avoir au moins un facteur quadratique réel, sa réduction de la solution des équations différentielles linéaires à intégrales définies ; et sa solution à l'équation différentielle linéaire partielle du second ordre. Il a développé la méthode de variation des constantes, qui permet de résoudre les équations différentielles linéaires avec second membre, lorsque la solution de l'équation sans second membre est connue. Il est également le premier à prendre en compte les problèmes complexes des équations aux différences mixtes et à montrer que la solution d'une équation aux différences finies de premier grade et du second ordre pourrait toujours être obtenue sous la forme d'une fraction continue. À ces découvertes originales s'ajoutent les valeurs des plus communes intégrales définies dans sa théorie des probabilités, et dans le même ouvrage, il fournit la démonstration générale du théorème énoncé par Joseph-Louis Lagrange pour le développement en série d'une fonction quelconque impliquée par des coefficients différentiels.

Cependant, la transformation de Laplace, bien qu'elle soit nommée en son honneur car il l'utilisa dans son travail sur la théorie des probabilités, a été initialement découverte par Leonhard Euler. La transformation de Laplace se manifeste dans toutes les disciplines de la physique mathématique - domaine d'étude auquel Laplace a apporté une contribution significative.

I.4.2 Pierre Louis Dulong :

Né à Rouen le 12 ou le 13 février 1785 et mort dans l'ancien 12^e arrondissement de Paris le 19 juillet 1838, est un chimiste et physicien français, auteur de travaux sur la chaleur spécifique, la dilatation et l'indice de réfraction des gaz .

I.4.2.1 Biographie :

Fils unique, laissé orphelin à quatre ans avec une fortune assez importante, il est confié à sa tante d'Auxerre et fait ses études secondaires au collège de cette ville, puis, en attendant l'âge de seize ans, suit un cours de grammaire générale et un cours de chimie à l'école centrale de Rouen.

En 1800, il revient à Auxerre pour passer les examens d'admission à l'École polytechnique, où il est seul admis sur les soixante candidats de son centre d'examen et y entre en 1801, à l'âge minimum de seize ans. Malgré son intérêt pour le génie maritime, il est, faute de places, placé dans l'artillerie de terre. Il quitte l'école d'artillerie avant la fin de la seconde année en raison de sa santé faible [9]

Il fait ensuite ses études de médecine à l'école de santé de Paris, métier qu'il exerce quelque temps dans un quartier pauvre du douzième arrondissement de Paris, le faubourg Saint-Marceau.

Par la suite, il se consacre aux sciences, d'abord à la botanique, puis à la chimie en devenant préparateur dans l'atelier de Berthollet où il étudie la réaction des sels solubles avec les sels insolubles.

Il est nommé, sous l'influence de Berthollet, répétiteur (puis maître de conférences) de physique

À la même époque (avril 1811), la faculté des sciences de Paris ouvre ses portes et il y prépare le cours de chimie de Louis-

Jacques Thénard et découvre le chlorure d'azote en octobre 1811.

En octobre 1812, il perd un œil et deux doigts lors d'une explosion.

Il est élu professeur de physique et de chimie à l'école vétérinaire d'Alfort le 24 juillet 1813, poste qu'il quittera pour raison de santé le 13 octobre 1827. Il y étudie l'acide nitreux, les acides phosphoriques et l'acide oxalique de 1813 à 1817. Il travaille en collaboration avec Petit sur la gestion de la chaleur.

Il devient en même temps examinateur de chimie à l'École polytechnique en 1812, de chimie et de physique en 1813, puis professeur de physique de 1820 à 1829, après Alexis Thérèse Petit, et directeur des études de 1830 à sa mort (à ce poste, il succède à Jacques Binet et Coriolis lui succèdera).

En 1820, il devient également professeur adjoint à la faculté des sciences de Paris auprès de Thénard, où il enseigne le 2^e semestre.

Il échange son cours de chimie en 1828 avec le cours de physique de Gay-Lussac et est nommé professeur titulaire de la chaire de physique en 1832.

En 1823, il est élu à l'Académie des Sciences (section de physique générale).

Son tombeau se trouve au cimetière du Père-Lachaise.

I.4.2.2 Travaux :

En 1812, Pierre Louis Dulong fit la découverte du chlorure d'azote en chimie. Il admit, avec Alexis Thérèse Petit, en physique que la chaleur spécifique des corps est proportionnelle à l'inverse du poids de leurs atomes.

Une théorie fut élaborée pour expliquer la valeur de la chaleur massique des métaux, appelée loi de Dulong et Petit.

Finalement, il calcula, en collaboration avec François Arago, la capacité élastique de la vapeur d'eau à diverses températures.

La plupart de ses écrits ont été publiés dans les Annales de chimie et de physique :

- Recherches sur la décomposition mutuelle des sels insolubles et des sels solubles (Annales de Chimie, t. LXXXII) ;
- Mémoire sur une nouvelle matière détonante (Mémoires de la Société d'Arcueil)
- Recherches sur les lois de la dilatation des solides, des liquides et des fluides élastiques, et sur la mesure exacte des températures ;
- Observations sur quelques combinaisons de l'azote et de l'oxygène ;
- Mémoire sur les combinaisons du phosphore avec l'oxygène (Mémoires de la Société d'Arcueil) ;
- Recherches sur la mesure des températures et sur les lois de la communication de la chaleur (Annales de chimie et de physique) ;
- Recherches sur quelques points importants de la théorie de la chaleur ;

- Nouvelle détermination des proportions de l'eau et de la densité de quelques fluides élastiques ;
- Notes sur la propriété que possèdent quelques métaux de faciliter la combinaison des fluides élastiques (Mémoires de l'Institut) ;
- Recherches sur les pouvoirs réfringents des fluides élastiques ;
- Recherches sur la force élastique de la vapeur d'eau ;
- Rapport, fait le 9 janvier 1832, avec MM. Arago, Prony et Cordier, sur un Mémoire relatif aux appareils producteurs de la vapeur, lu à l'Académie des Sciences, par le baron Segurier ; Paris, 1832, in-8°

I.4.2.3 : Hommages :

- Une rue du 17^e arrondissement de Paris porte son nom depuis 1864.
- Son nom est inscrit sur la tour Eiffel.
- Une rue porte son nom dans le centre historique de Rouen.

I.4.3 Nicolas Clément (chimiste) :

Nicolas Clément, dit aussi Nicolas Clément-Desormes, né le 12 janvier 1779 à Dijon et décédé le 21 novembre 1841 à Paris), est physicien et chimiste français.

I.4.3.1 Biographie :

Nicolas Clément, d'origine modeste, fit ses études de droit à Dijon et devint notaire à Paris. Dès 1801, il étudia la chimie au Jardin des Plantes et travaillait avec l'ingénieur Charles Desormes sur la synthèse chimique et la transmission de la chaleur dans les gaz. En 1813, il se maria avec la fille de son collaborateur.

Après avoir découvert l'iode, Bernard Courtois avait commencé à étudier ses propriétés de combinaison. Cependant, trop occupé par l'exploitation de sa nitrière, il la laissa à deux chimistes de sa connaissance : Charles-Bernard Desormes et Nicolas Clément, qui publièrent leurs travaux en 1813. Depuis lors, l'iode a acquis une telle importance dans l'industrie et la médecine.

En réalité, son nom est dû à Louis Joseph Gay-Lussac, à qui Courtois avait fourni des échantillons : le terme provient de l'adjectif grec iodés (« violet »), en raison des vapeurs violettes que la solution alcoolique d'iode dégage lorsqu'elle est chauffée.

Jusqu'à la Première Guerre mondiale, l'iode jouera un rôle essentiel dans la pharmacopée : la teinture d'iode, une solution d'alcool titrée entre 8 et 10 %, sera l'antiseptique et cicatrisant universel des armées.

De plus, des pharmaciens suisses réaliseront que l'iode peut être utilisé comme un remède efficace contre les goîtres.

Après avoir constitué un petit capital, il engagea Charles Desormes dans une compagnie de produits chimiques (1806) et ils effectuèrent l'expérience de Clément-Desormes en 1819. Il était depuis 1816 membre de la Société philomathique de Paris. Au début des années 1820, Nicolas Clément changea son nom en Clément-Desormes, après avoir épousé la fille de son collaborateur et associé Charles-Bernard Desormes.

Il construisit à Verberie l'une des premières manufactures d'alun et enseigna la chimie appliquée aux arts au Conservatoire national des arts et métiers. Des mémoires sur l'oxyde et le sulfure de carbone, sur l'outremer, sur la production d'acide sulfurique, sur la distillation de l'eau de mer, etc., sont conservés de lui.

Il a également travaillé sur l'alun et l'acide sulfurique. En 1824, il donne une définition de la calorie en la décrivant comme la chaleur nécessaire pour élever un kilogramme d'eau à 1 °C sous la pression atmosphérique, c'est-à-dire avec une valeur 1000 fois supérieure à celle d'aujourd'hui (mais qui reste l'unité utilisée par les nutritionnistes).

Au début de l'année 1840, il développa des troubles mentaux et fut placé sous tutelle quelques mois plus tard.

I.4.4 Victor Regnault :

Victor Regnault, né le 21 juillet 1810 à AixChapelle et décédé le 19 janvier 1878 à Paris1, est un chimiste, physicien et photographe français, célèbre pour ses analyses précises des caractéristiques thermiques des gaz.

I.4.4.1. Biographie :

Orphelin à l'âge de huit ans, Henri Victor Regnault est le fils d'André Privat Regnault, capitaine au corps des ingénieurs géographes militaires dans la Grande

Armée, qui est mort en 1812 lors de la campagne de Russie. Il est admis à l'école polytechnique en 1830, puis à l'école des mines en 1832

La découverte de la formation du polychlorure de vinyle par Victor Regnault en 1835 peut être considérée comme l'inventeur du PVC, qui sera redécouverte en 1872 par Eugen Baumann. Dans les deux cas, on a observé l'apparition du polymère en tant que solide blanc dans des bouteilles de chlorure de vinyle après avoir été exposées à la lumière solaire. Jusqu'au début du XXe siècle, l'industrialisation du PVC sera confrontée aux problèmes de transformation du polymère. La réponse ne sera élaborée qu'en 1926.

Il invente l'hypsomètre en 1845, un petit instrument portable pour mesurer la pression ou l'altitude

Ses pairs reconnaissent et récompensent les mérites scientifiques de Regnault. En juillet 1840, il est élu membre de l'Académie des Sciences. Il occupe en 1841 la chaire de physique générale et expérimentale du collège de France, après Félix Savart et avant Éleuthère Mascart. Il est élu membre de la Royal Society en 1852 et médaillé Rumford en 1848 et Copley en 1869. En 1863, il est nommé commandeur de la Légion d'honneur. Il est directeur de la manufacture de Sèvres entre 1854 et 1871.

Ses pairs reconnaissent et récompensent les mérites scientifiques de Regnault. En juillet 1840, il est élu membre de l'Académie des Sciences. Il occupe en 1841 la chaire de physique générale et expérimentale du collège de France, après Félix Savart et avant Éleuthère Mascart. Il est élu membre de la Royal Society en 1852 et médaillé Rumford en 1848 et Copley en 1869. En 1863, il est nommé commandeur de la Légion d'honneur. Il est directeur de la manufacture de Sèvres entre 1854 et 1871.

Regnault est également un photographe à la pointe de la technologie ; il est le premier à utiliser le pyrogallol comme agent de développement photographique, et l'un des premiers à utiliser du papier pour les négatifs. Il enseigne à Louis-Rémy Robert cet art. En 1852, il présente à la Royal Society of Arts à Londres.

I.4.4.2 Hommages :

- Son nom est inscrit sur le premier étage de la tour Eiffel, parmi celui des 72 savants qui y sont gravés : le 18^e, sur la face tournée vers le sud.
- Le cratère d'impact lunaire Regnault porte son nom en son honneur depuis 1935.

Chapitre II

Généralités sur les
chambres froides
et les machines
frigorigifiques

II.1 Introduction

Une chambre froide est une installation industrielle utilisée pour l'entreposage de denrées périssables afin de les conserver à basse température. Elle permet le refroidissement d'un corps en extrayant une partie de sa chaleur. Les chambres froides sont essentielles dans les grandes surfaces, la restauration, les entrepôts, les laboratoires, l'industrie agro-alimentaire, etc. Elles permettent de stocker des denrées alimentaires et de préserver leurs qualités nutritionnelles sur une durée prolongée. En maintenant une température inférieure à celle de l'environnement, on peut retarder le processus de détérioration de plusieurs mois. Une chambre froide peut également servir à traiter à basse température des meubles en bois, des livres, des objets d'art, etc., pour éliminer les insectes xylophages. Dans le domaine médical, les morgues disposent de chambres froides pour conserver les cadavres humains.

D'autre part, les machines frigorifiques permettent d'extraire de la chaleur des milieux à refroidir en fournissant un apport énergétique. Elles rejettent cette chaleur, accompagnée de l'équivalent thermique de l'énergie reçue, à une température plus élevée dans le milieu ambiant. Ces machines peuvent également être utilisées comme systèmes de chauffage. Si vous souhaitez en savoir plus sur les machines frigorifiques industrielles, je vous invite à consulter cet article.

En somme, les chambres froides et les machines frigorifiques jouent un rôle essentiel dans la conservation des produits périssables et la maîtrise des températures dans divers secteurs d'activité.

II.2 La thermodynamique

La thermodynamique est la discipline qui explore les lois qui préparent les échanges d'énergie, en particulier celles qui traitent des conversions de l'énergie calorifique ou thermique en une autre forme d'énergie (mécanique, chimique, etc.). Donc c'est une branche cruciale de l'énergétique. [1]

II.2.1 Les principes de la thermodynamique

➤ Le principe zéro de la thermodynamique :

Ce principe concerne la notion d'équilibre thermique. Ainsi, il est à la base de la thermométrie et s'énonce ainsi : si deux systèmes sont en équilibre thermique avec un troisième, alors ils sont aussi ensemble en équilibre thermique. [2]

➤ Premier principe de la thermodynamique (loi de conservation de l'énergie) :

Au cours d'une transformation l'énergie n'est ni créée ni détruite : elle peut être convertie d'une forme en une autre (travail, chaleur) mais la quantité totale d'énergie reste invariable.

Cette loi constitue le premier principe de la thermodynamique : l'énergie du système + celle du milieu extérieur est constante lors d'une transformation, quelle que soit la nature de cette transformation. [2]

On aura donc la relation suivante :

$$\sum(Q + W)_{\text{cycle}} = 0$$

II.1

Où Q et W représentent chaleur et travail échangés avec l'extérieur.

➤ Deuxième principe de la thermodynamique :

Ce principe énonce que toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie globale incluant l'entropie du système et du milieu extérieur. On dit alors qu'il y a création d'entropie (l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter ou rester constante, car il n'y a pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur). [2]

La fonction d'état entropie, notée $\{S\}$ est définie telle que :

$$\Delta S_{global} = \Delta S_{creation} = \Delta S_{syst} + \Delta S_{ext} \geq 0 \quad \text{II.2}$$

Dans le cas d'une transformation réversible, la création globale d'entropie est nulle.

La principale différence de ce principe avec le premier principe de la thermodynamique est l'origine statique de ce deuxième principe. En effet, les lois microscopiques qui gouvernent la matière ne le contiennent qu'implicitement et de manière statique. Cependant, le deuxième principe de la thermodynamique reste relativement indépendant des caractéristiques et des lois précédemment citées puisqu'il apparaît même si l'on suppose des lois simplistes à petite échelle.

➤ **Troisième principe de la thermodynamique :**

Le troisième principe de la thermodynamique, également appelé théorème de Nernst, stipule que l'entropie d'un système quelconque peut toujours être prise égale à zéro à la température du zéro absolu. En d'autres termes, lorsque la température approche le zéro absolu (0 K), l'entropie tend vers une valeur constante.

En somme, ce principe est lié à l'entropie et à la température d'un système physique, et il joue un rôle essentiel dans notre compréhension des phénomènes thermiques. [2]

II.2.2 Laplace en thermodynamique

En thermodynamique, cette loi exprime la relation entre la pression et le volume d'un gaz parfait lorsqu'il subit une transformation isentropique ou adiabatique et réversible. Cependant, cette relation peut également être étendue pour inclure la température et le volume, ainsi que la température et la pression.

La loi de Laplace suppose que les capacités thermiques restent constantes, alors que celles d'un gaz parfait varient en fonction de la température, comme le stipule la loi des gaz parfaits. Par conséquent, cette loi ne peut être appliquée dans les transformations où les variations de température sont négligeables. [2]

On peut alors considérer que les capacités thermiques sont constantes.

$$P \times V = n \times R \times T \quad \text{II.3}$$

Avec :

- P est la pression d'un gaz (en pascals),
- V le volume occupé par le gaz (en m³),
- n la quantité de matière (en moles),
- R la constante universelle des gaz parfaits (8,3144621 J/K/mol)
- Et T est la température (en kelvins).

II.2.3 Les transformations thermodynamiques

Transformation	Isotherme	Isobare	Isochore	Isentropique (=Défente Adiabatique reversible)	Polytropique
Loi de la Transformation	$PV=Cte$ (Loi de Joule)	$P=Cte$	$V=Cte$	$PV^\gamma=Cte$ $TV^{\gamma-1}=Cte$ $T^\gamma P^{1-\gamma}=Cte$ (Loi de Laplace)	$PV^K=Cte$
Travail W	$-nRT\ln(V_2/V_1)$ $nRTL\ln(P_2/P_1)$	$-nRTL\ln(V_2/V_1)$	$W=0$	$(nR/\gamma-1) (T_2-T_1)$ $(P_2V_2-P_1V_1)/(\gamma-1)$	$(nR/K-1) (T_2-T_1)$ $(P_2V_2-P_1V_1)/(K-1)$
Energie Interne ΔU	$nC_v(T_2-T_1)$ ($T_2=T_1$) $\Rightarrow \Delta U=0$	$nC_v(T_2-T_1)$	$nC_v(T_2-T_1)$	$nC_v(T_2-T_1)$	$nC_v(T_2-T_1)$
Transfert Thermique Q	$nRTL\ln(V_2/V_1)$	$nC_p(T_2-T_1)$	$nC_v(T_2-T_1)$	$Q=0$	$nC_v(T_2-T_1)^*$ $(1-(\gamma-1))/(K-1)$
Entropie ΔS	$nRL\ln(V_2/V_1)$	$nC_p\ln(T_2/T_1)$	$nC_v\ln(T_2/T_1)$	$\Delta S=0$	***
Enthalpie ΔH	$\Delta H=0$	$nC_p(T_2-T_1)$	$nC_p(T_2-T_1)$	$nC_p(T_2-T_1)$	$nC_p(T_2-T_1)$

[3]

Tableau 1 : transformations thermodynamiques

II.2.4 Les réactions d'une transformation thermodynamique

- **Réactions exothermiques** : sont des réactions qui dégagent de l'énergie sous forme de chaleur et augmentant ainsi le degré énergétique de leur milieu, on peut y voir une augmentation de température ou une émission de lumière.
- **Réactions endothermiques** : sont des réactions qui réduisent l'énergie du milieu en absorbant de l'énergie. On peut y voir une diminution de la température dans l'environnement. [4]

II.3 Généralités sur les chambres froides

Sont des établissements industriels qui servent à stocker des denrées périssables à une température basse. Elles sont utilisées pour refroidir un corps en éliminant une partie de sa chaleur. Ces pièces jouent un rôle crucial dans différents domaines tels que les grandes surfaces, la restauration, les entrepôts, les laboratoires, l'industrie agro-alimentaire, et bien d'autres encore. La durée de conservation des aliments est prolongée et leurs qualités nutritionnelles sont préservées.

II.3.1 Les types de chambres froides : Il existe deux catégories :

- **Chambres froides positives** : Elles maintiennent une température au-dessus de 0 °C et sont utilisées pour conserver les aliments. La température d'évaporation y est généralement de -5 °C.
- **Chambres froides négatives** : Elles sont capables de maintenir une température inférieure à 0 °C et sont utilisées pour la conservation à long terme. [5]



[6]

Figure II.1 : chambre froide alimentaire

II.3.2 Avantages et inconvénients d'une chambre froide

II.3.2.1 Avantages

- Une chambre froide peut conserver une importante quantité de produits, que ce soit sur une courte ou une longue durée.
- Elle peut être fabriquée sur mesure en fonction de la taille et de l'envergure de votre activité.
- Elle peut être utilisée dans divers domaines, tels que la restauration, les métiers de bouche, etc.
- Elle facilite l'entretien des œuvres et objets d'art en assurant l'extermination des insectes xylophages.
- Elle respecte la chaîne de froid dans le secteur pharmaceutique et hospitalier (médicaments réfrigérés, échantillons, etc.). [7]

II.3.2.2 Inconvénients

- **Coûts de fonctionnement plus élevés** : Le système de réfrigération d'une chambre froide consomme de l'énergie en continu pour maintenir la température basse, cela se traduit par des coûts d'électricité plus élevés, notamment pour les grandes installations.
- **Installation technique complexe et coûteuse** : La mise en place d'une chambre froide nécessite une expertise technique, donc les composants (panneaux isolants, portes frigorifiques, etc.) doivent être correctement installés pour garantir une isolation optimale.
- **Adaptation au système** : Les utilisateurs peuvent nécessiter un temps d'adaptation pour comprendre le fonctionnement, la gestion des températures, l'entretien de la chambre, et les cycles de dégivrage, etc...
- **Risque de contamination bactérienne** : Si les procédures d'hygiène ne sont pas rigoureusement suivies, il existe un risque de contamination des produits stockés, car une température basse ne garantit pas toujours l'absence de bactéries.
- **Entretien et nettoyage réguliers** : Les chambres froides nécessitent un entretien fréquent pour assurer leur bon fonctionnement (nettoyage des surfaces, des joints, des évaporateurs, etc....) qui est essentiel pour éviter les problèmes. [7]

II.3.3 Les normes d'hygiène d'une chambre froid

Pour assurer la conservation des aliments, il est essentiel que les chambres froides respectent des normes de santé et d'hygiène rigoureuses. La chambre froide doit avoir des surfaces lisses et faciles à nettoyer.

Il est important que les matériaux utilisés ne produisent pas d'odeur ou de produits volatils qui ne sont pas compatibles avec les produits entreposés ou transformés. [8]

II.3.4 Quelques bonnes pratiques d'hygiène :

- Éviter la contamination croisée ;

- Nettoyer et/ou désinfecter de manière efficace ;
- Éviter le contact avec des substances toxiques ;
- Offrir des conditions de température permettant d'effectuer de manière hygiénique les opérations visées ;
- Aérer, ventiler, éclairer convenablement ;
- Se doter de moyens d'évacuation des eaux résiduelles et eaux de lavage ;
- Disposer d'aires de stockage des déchets convenablement gérées ;
- Éviter l'encrassement, le contact avec les matériaux toxiques, le déversement de particules.
- Offrir des conditions de température stables.

II.4 Les machines frigorifiques :

Sont des dispositifs qui permettent d'extraire de la chaleur d'une source froide. Elles sont utilisées dans divers domaines, tels que la climatisation, la congélation et la réfrigération des produits périssables. [9]

II.3.2.1 Principe de fonctionnement :

Une machine frigorifique utilise un fluide frigorigène pour extraire de la chaleur d'un milieu à refroidir.

Dans une machine frigorifique on utilise un fluide frigorigène qui commence son cycle sous forme de vapeur à basse pression dans l'évaporateur. Ici, il absorbe la chaleur de l'environnement, ce qui provoque son ébullition et sa transformation en vapeur. Cette vapeur est ensuite aspirée par le compresseur qui la comprime, augmentant ainsi sa pression et sa température. La vapeur haute pression se dirige vers le condenseur. Là, elle libère sa chaleur et devient un liquide à haute pression. Ce liquide passe par le détendeur, qui baisse sa pression et température. Il revient à son état initial de vapeur à basse pression et température. [9]

Ce cycle se répète continuellement, produisant ainsi un effet de refroidissement.

II.3.2.2 Types de machines frigorifiques :

- **Machine à compression** : la vapeur subit une compression (que nous supposons dans le cycle idéal, compression isentropique), le cycle de production de froid est alors dénommé cycle à compression
- **Machine à absorption** : la vapeur est successivement absorbée (à l'étage BP) dans un liquide absorbant, transférée de la basse pression à la haute pression grâce à une pompe, désorbée dans un bouilleur (à l'étage HP), ce cycle de production de froid est alors dénommé cycle à absorption
- **Machine à éjection** : La vapeur de réfrigérant à haute pression est ensuite dirigée vers un éjecteur où elle est mélangée avec la vapeur de réfrigérant à basse pression provenant de l'évaporateur. L'éjecteur, grâce à son design spécifique, utilise l'énergie de la vapeur à haute pression pour aspirer et comprimer la vapeur à basse pression, augmentant ainsi sa pression. [10]

II.6 Les applications industrielles des froids

- **Industrie agroalimentaire** : Conservation des aliments et congélation.
- **Industrie chimique et pharmaceutique** : Stockage de produits sensibles à la température, réactions chimiques à basse température (la cryogénie est utilisée pour des réactions spécifiques).
- **Industrie automobile et aérospatiale** : Refroidissement des moteurs.
- **Industrie du plastique et du caoutchouc** : Extrusion et moulage (le refroidissement rapide des polymères est essentiel pour obtenir des produits finis de qualité).
- **Industries chimiques et pétrochimiques** : Liquéfaction des gaz pour le transport, déparaffinage, débenzolage...
- **Autres domaines** : Patinoires et production de neige, stockage de produits chimiques inflammables. [11]

II.7 Les moyens de production de froid

Il y a trois principales méthodes de production de froid :

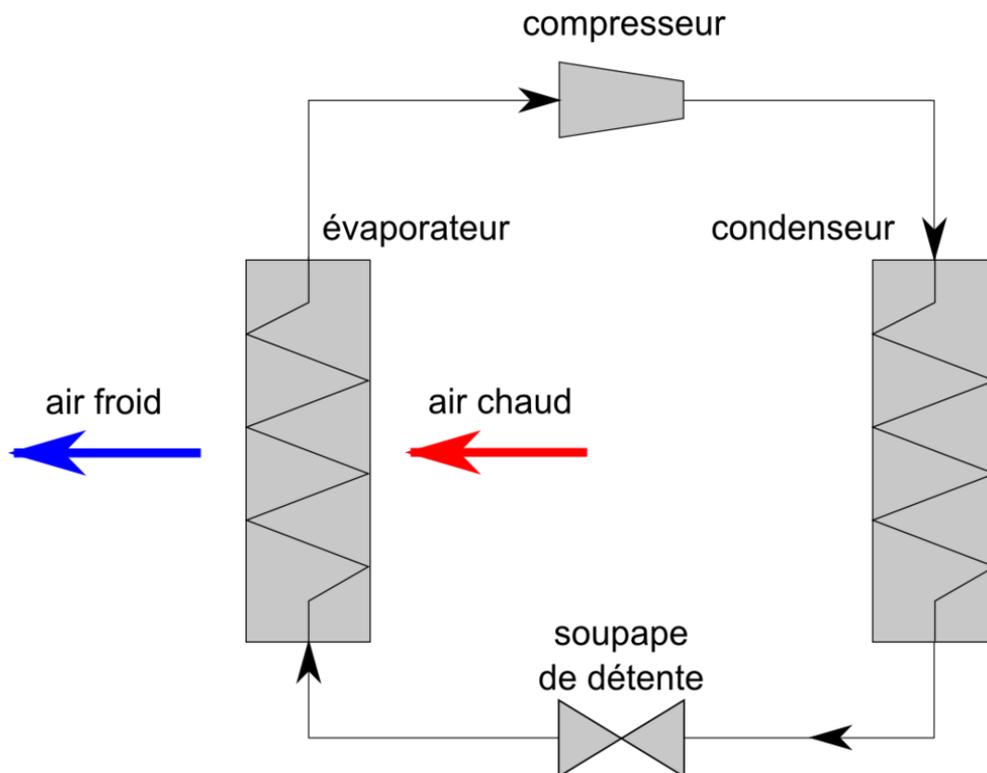
- **Mélanges réfrigérants** : Les mélanges réfrigérants sont souvent utilisés dans les systèmes de climatisation et de réfrigération.
- **Détente d'un gaz comprimé** : Ce principe repose sur la détente rapide d'un gaz comprimé, ce qui entraîne un refroidissement, les compresseurs à pistons sont couramment utilisés pour ce type de production de froid.
- **Évaporation d'un liquide pur ou d'un mélange de liquides purs** : L'évaporation d'un liquide, comme l'ammoniac ou le fréon, permet de produire du froid, les machines mono-étagées, à compression mécanique de vapeur, utilisent ce principe.
- **Production de neige carbonique** : maintien du froid à basse température [12]



Figure II.2 : La production de neige artificielle

II.8 Le cycle frigorifique

Le cycle frigorifique est un processus thermodynamique essentiel utilisé pour transférer de la chaleur ou de l'énergie. Il comporte quatre éléments essentiels : le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. Ce cycle fonctionne en quatre étapes :



Cycle frigorifique

[13]

Figure II.3 : Cycle frigorifique

➤ Compression :

Le compresseur aspire le fluide à basse pression et basse température.

L'énergie mécanique de la compression élève la pression et la température du fluide.

Le fluide circule dans le circuit frigorifique sous forme gazeuse.

➤ **Condensation :**

Les gaz chauds haute pression et haute température provenant du compresseur se dirigent vers le condenseur.

Le condenseur est un échangeur de chaleur qui permet au fluide de se condenser en échange avec un fluide extérieur (comme l'eau ou l'air) à température et pression constantes, la vapeur se transforme progressivement en liquide.

➤ **Détente :**

Le liquide sous-refroidi est partiellement vaporisé par une baisse brusque de pression au passage de l'orifice calibré du détendeur. Le détendeur module le débit du fluide dans l'évaporateur.

➤ **Évaporation :**

L'évaporateur est également un échangeur de chaleur.

Le fluide liquide provenant du détendeur entre en ébullition ou évaporation dans l'évaporateur en absorbant de la chaleur du fluide extérieur (comme l'eau ou l'air).

C'est la phase d'évaporation (changement d'état liquide/vapeur).

Le fluide est ensuite aspiré par le compresseur pour un nouveau cycle. [13]

II.9 Le coefficient de performance

Le coefficient de performance d'une machine frigorifique est un indicateur essentiel de son efficacité énergétique.

Le COP est le rapport entre la chaleur produite par la pompe à chaleur et le travail mécanique fourni (généralement par le compresseur).

Plus le COP est élevé, plus la pompe à chaleur est performante.

Mathématiquement, le COP est défini comme :

$$COP = \frac{|Q|}{W} \quad \text{II.3}$$

Où **Q** est la chaleur utile à l'échangeur et **W** est le travail mécanique absorbé par le compresseur. Chaleur et travail étant des énergies, exprimées en joules, le **COP** est sans unité. [14]

II.10 Les fluides frigorigènes

Un fluide frigorigène (ou réfrigérant) est un liquide qui facilite la réalisation d'un processus de réfrigération. Il est possible qu'il soit pur ou qu'il soit un mélange de fluides purs en phase liquide, gazeuse ou les deux à la fois, en fonction de la température et de la pression, Ils sont utilisés pour refroidir des dispositifs réfrigérants (réfrigérateur, congélateur, climatiseur...). [15]



Figure II.4 : Un ensemble des fréons frigorigènes

II.10.1 Les différentes catégories de fluide frigorigène

- Le gaz réfrigérant a différentes catégories de molécules :
- Les chlorofluorocarbures (CFC) ;
- Les hydro chlorofluorocarbures (HCFC) ;
- Les hydrofluorocarbures (HFC) ;
- Les per fluorocarbures (PFC) ou hydrocarbures per fluorés ;
- Les hydrocarbures ou composés organiques ne faisant pas partie des catégories précédemment citées ;
- Les composés inorganiques comme l'ammoniac.

II.10.2 Critère de choix d'un fluide frigorigène

Le choix d'un fluide frigorigène dépend de plusieurs critères essentiels, parmi ces critères on a :

- **Critères thermodynamiques** : Puissance frigorifique volumétrique élevée, Température critique élevée, pression adaptée aux matériels et aux conditions d'utilisation et bonnes propriétés thermodynamiques en général
- **Critères de sécurité** : il faut être non inflammable et non toxique
- **Critères environnementaux** : GWP (Potentiel de réchauffement global)
- **Critères économiques** : viable dans le temps, rapport efficacité/prix.

II.11 L'isolation dans système de froid

L'isolation thermique dans les chambres froides est essentielle pour maintenir une température idéale et garantir l'efficacité énergétique. [16]

II.11.1 Rôle de l'isolation thermique :

L'isolation thermique consiste à minimiser la transmission de l'énergie calorifique entre différents espaces adjacents.

Elle crée une barrière qui empêche la chaleur de pénétrer et maintient ainsi l'intérieur de la chambre à une température adaptée.

II.11.2 Matériaux isolants :

Les matériaux isolants doivent être résistants au passage de l'énergie.

Ils sont utilisés dans la construction des chambres froides, que ce soit pour le sol, le plafond ou les murs.

Historiquement, le liège était utilisé, mais il a été remplacé par des matériaux organiques dérivés du pétrole, comme les plaques de polystyrène expansé (PSE).

II.11.3 Avantages de l'isolation thermique :

- **Économie d'énergie :** L'isolation est la meilleure solution pour économiser de l'énergie.
- **Prévention des dommages :** Elle évite la corrosion, la condensation et la pénétration d'humidité dans la couche d'isolation.

En somme, une conception rigoureuse et l'utilisation de matériaux adaptés sont essentielles pour garantir la performance optimale des chambres froides. [16]

Chapitre III

Caractéristiques du
système hybride
photovoltaïque-
éolien

III.1 Introduction

Afin d'atteindre un développement durable, il est devenu essentiel d'utiliser des systèmes énergétiques à base d'énergies renouvelables.

Les générateurs hybrides offrent de nouvelles solutions technologiques, bien qu'elles soient très complexes par rapport aux solutions traditionnelles mono-source, mais elles présentent un intérêt évident considérable en raison de leur flexibilité inégalée, de leur souplesse de fonctionnement et de leur prix de revient vraiment intéressant. Toutefois, ces solutions nécessitent d'abord une évaluation approfondie qui repose sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir-faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra garantir.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les diverses caractéristiques du système hybride, en se référant aux diverses définitions des éléments qui le composent.

III.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables désignent des sources d'énergie naturelles qui se renouvelant à un rythme plus rapide que celui de leur consommation. Par exemple, la lumière du soleil et le vent sont de telles sources qui se renouvellent en permanence. Il existe de nombreuses sources d'énergie renouvelable qui se trouvent partout autour de nous.

Les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont en revanche des ressources non renouvelables qui nécessitent des centaines de millions d'années pour se former. Lorsqu'ils sont utilisés pour générer de l'énergie, les combustibles fossiles génèrent des émissions de gaz à effet de serre néfastes, comme le dioxyde de carbone.

Dans la plupart des pays, les énergies renouvelables sont maintenant plus abordables et génèrent trois fois plus d'emplois que les combustibles fossiles. [17]

III.3 Les sources d'énergie renouvelables courantes

Énergie solaire : La lumière du soleil est la plus abondante de toutes les ressources énergétiques. Les technologies solaires permettent de produire de l'électricité, de la chaleur, de l'éclairage naturel et des carburants. Les panneaux photovoltaïques convertissent la lumière solaire en électricité. [18]



Figure III.1 Panneau solaire

Énergie éolienne : Exploite l'énergie cinétique de l'air en mouvement à l'aide d'éoliennes terrestres ou en mer. Les turbines éoliennes produisent de l'électricité.

Énergie géothermique : Utilise la chaleur du sous-sol terrestre pour produire de l'électricité ou chauffer des bâtiments.

Énergie hydroélectrique : L'énergie hydraulique ou hydro-électrique est celle produite par l'eau qui est stockée dans des réservoirs et des lacs à haute altitude (de sorte qu'elle possédait une énergie potentielle gravitationnelle). Si, à un moment donné, elle tombe à un niveau inférieur, cette énergie est transformée en énergie cinétique puis en énergie électrique dans la centrale.

Énergie marine : Les technologies de l'énergie marine exploitent l'énergie cinétique et thermique de l'eau de mer (comme les vagues ou les courants, par exemple) afin de générer de l'électricité ou de la chaleur.

Énergie biomasse : La biomasse est une expression utilisée dans le domaine industriel afin de générer de l'énergie en utilisant des matières organiques issues de plantes et d'animaux. Les biomasses lignocellulosiques sont des plantes ou des

matières végétales qui ne sont pas destinées à l'alimentation humaine ou animale. Il est possible d'utiliser la biomasse comme une source d'énergie renouvelable et durable, que ce soit directement par combustion pour générer de la chaleur ou indirectement après conversion en différentes formes de biocarburants. [18]



Figure III.2 : Centrale de l'énergie biomasse

III.4 Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie dispose d'un important potentiel en énergies renouvelables de l'Algérie, en particulier dans le solaire et l'éolien, est en effet considérable. Exploiter pleinement ces ressources permettrait non seulement de sécuriser l'approvisionnement énergétique du pays, mais aussi de créer de nouvelles opportunités d'emploi et de stimuler le développement économique dans des secteurs tels que la fabrication d'équipements, la construction et l'ingénierie.

L'économie algérienne étant fortement tributaire du secteur des hydrocarbures, il est impératif et urgent d'emprunter une nouvelle trajectoire en développant des énergies alternatives. Cette démarche s'inscrit dans une perspective de rareté des ressources, de réchauffement climatique et de développement durable.

Pour maximiser les avantages des énergies renouvelables, il est essentiel d'adopter une approche intégrée et à long terme. Cela implique non seulement d'investir dans la production d'énergie propre, mais aussi de mettre en place des politiques et des incitations qui favorisent l'efficacité énergétique, la conservation des ressources et la transition vers une économie plus durable. [19]

III.5 La relation entre l'énergie renouvelable et le froid

La relation entre la production d'énergie renouvelable et le froid est souvent liée à l'utilisation de l'électricité produite à partir de sources renouvelables pour alimenter des systèmes de réfrigération et de climatisation, tout en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la promotion de la durabilité environnementale. Voici quelques points clés à considérer :

- **Utilisation de l'électricité renouvelable :** Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique sont utilisées pour produire de l'électricité. Cette électricité peut être utilisée pour alimenter des systèmes de réfrigération et de climatisation, contribuant ainsi à maintenir des températures froides dans diverses applications, notamment dans les bâtiments, les entrepôts, les installations de stockage alimentaire et les véhicules de transport réfrigérés.
- **Stockage d'énergie :** Les énergies renouvelables peuvent également être utilisées pour stocker de l'énergie pouvant être utilisée pour produire du froid ultérieurement. Par exemple, l'énergie solaire peut être utilisée pour alimenter des systèmes de climatisation qui produisent du froid pendant la journée. Cet excès de froid peut être stocké dans des systèmes de stockage thermique pour une utilisation ultérieure lorsque le soleil n'est pas disponible, permettant ainsi de maximiser l'utilisation de l'électricité renouvelable.
- **Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles :** En utilisant l'électricité produite à partir de sources renouvelables pour le froid, on réduit la dépendance aux combustibles fossiles, ce qui contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à atténuer le changement climatique. Cela contribue également à la sécurité énergétique en réduisant la dépendance aux importations de combustibles fossiles. [20]

III.6 Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides :

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Ces systèmes complexes combinent diverses sources renouvelables ou sont combinées avec des sources conventionnelles telles que les générateurs diesel ou les réseaux électriques, ainsi que divers éléments de stockage

et charges. Les sources renouvelables peuvent être compensées pour leur caractère intermittent et leur rendement énergétique global est plus élevé.

Dans sa vision la plus globale, le système hybride de production d'énergie est celui qui combine et exploite différentes sources facilement exploitables. Le système qui nous intéresse comprend deux éléments essentiels pour la génération d'énergie.

Pour le premier cas, les systèmes d'énergie hybrides peuvent être reliés aux réseaux électriques ou autonomes. En conséquence, la production énergétique hybride est centralisée et connectée à plusieurs sites de production et de consommation. Les sources hybrides doivent être connectées aux réseaux électriques en respectant certaines normes qui ne sont pas nécessairement propres au secteur des énergies renouvelables.

Dans les zones isolées où le réseau n'est pas présent, il est donc commode et dans la plupart des cas indispensable que le système hybride soit totalement autonome. Il est donc essentiel d'intégrer au système un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou hydrogène, car la consommation et la production sont fortement séparées. [21]

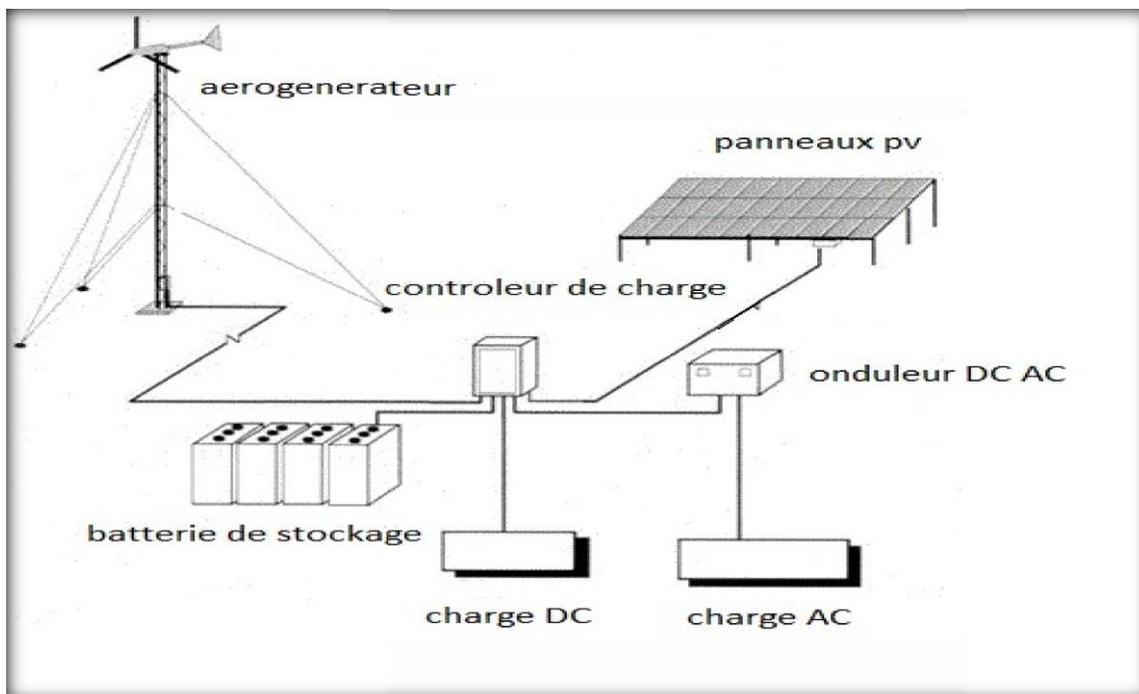


Figure III.3: Schéma générale d'une installation hybride éolien-photovoltaïque avec système de stockage

III.7 Principe de fonctionnement de système hybride étudié :

Dans cette étude, nous avons deux sources différentes d'énergies renouvelables la première est principalement dépendant du rayonnement solaire, l'autre source est l'énergie éolienne. Et la troisième source réseaux électriques, est une source stable et fiable, elle est prise point de référence par notre contrôleur hybride.

Le contrôleur hybride fonctionne en suivant une loi logique. Il est équipé de plusieurs entrées pour recevoir l'énergie électrique provenant de nos trois sources (solaire – éolienne – réseaux électriques) et d'une sortie pour fournir de l'électricité à notre consommation.

Grâce à ces capteurs, il est possible de mesurer les niveaux d'énergie obtenus par les trois sources et de promouvoir l'utilisation de l'énergie solaire en raison qu'elle est la moins coûteuse. Si la charge nécessite davantage d'énergie, il est possible d'ajouter la différence provenant de l'énergie éolienne. Si nécessaire, il utilise l'énergie fournie par le réseau électrique. Ce type de gestion d'énergie est appelé **Système Hybride**.

La figure suivante récapitule le principe de fonctionnement et le branchement entre les différents systèmes.

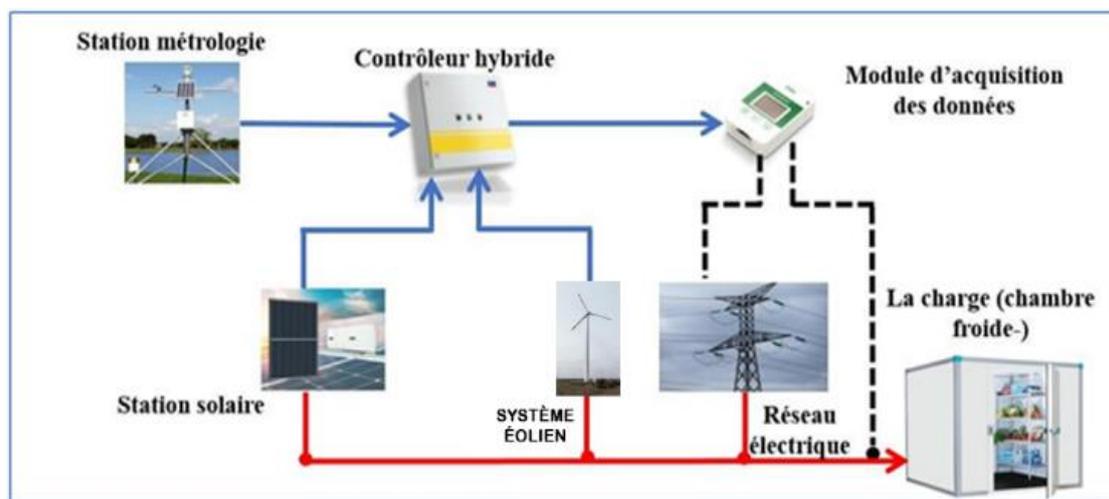


Figure III.4: Principe de fonctionnement système hybride.

III.8 Composants d'un système hybride :

III.8.1 Système photovoltaïque : Un système solaire photovoltaïque est une combinaison d'éléments visant à générer de l'électricité grâce à l'énergie solaire. Il s'agit d'une forme d'énergie renouvelable qui absorbe et gère le rayonnement solaire grâce à des panneaux solaires. Il est composé de :

- **Panneaux solaires :** Les panneaux solaires jouent un rôle crucial dans un système de production d'énergie solaire. Les dispositifs photovoltaïques sont des dispositifs capables de capter le rayonnement solaire et de convertir l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ce genre d'écran solaire est constitué de petits éléments connus sous le nom de cellules solaires.
- **Onduleurs :** L'onduleur est un appareil électronique chargé de convertir le courant continu en courant alternatif dans un système photovoltaïque pour maximiser l'approvisionnement en électricité. Ce système utilise un panneau solaire photovoltaïque qui produit de l'électricité en courant continu. Il est possible de convertir ce courant en une tension alternative en utilisant un onduleur de courant et de l'injecter dans le réseau.
- **Suiveurs solaires :** Pour améliorer leurs performances, les suiveurs solaires ont pour rôle d'orienter la position des panneaux solaires en fonction de la position du Soleil. Il est largement utilisé dans les grands panneaux solaires. Le dispositif de suivi solaire est composé d'un ou deux moteurs électriques et, habituellement, d'un capteur solaire afin de repérer la position du Soleil et de calculer l'inclinaison optimale du panneau.
- **Câblage électrique :** L'énergie électrique est transportée depuis sa production jusqu'à sa distribution et son transport ultérieur grâce au câblage électrique. Le critère le plus limitant entre la différence de potentiel maximale et l'intensité maximale admissible est donc utilisé pour déterminer sa dimension. Le dimensionnement du câblage électrique revêt une importance considérable lorsqu'il s'agit de systèmes solaires connectés au réseau. Toutefois, pour les systèmes hors réseau, il est simplement nécessaire de transmettre l'énergie électrique localement, habituellement vers des batteries solaires.

- **Batteries solaires :** Il est essentiel d'avoir des batteries solaires dans un système solaire hors réseau. En règle générale, l'énergie produite par les panneaux solaires n'est pas adéquate pour fournir une alimentation à votre domicile en cas de nécessité. L'objectif de ce composant est de stocker l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique et de la préserver pour être fournie en cas de nécessité.
- **Régulateur de charge :** Un dispositif appelé régulateur de charge permet de contrôler le débit d'électricité d'un système photovoltaïque (PV) vers un groupe de batteries ou une autre source de charge. Il est crucial d'avoir des régulateurs de charge dans une installation solaire autonome afin de s'assurer que les batteries ne sont pas surchargées et endommagées. [22]

III.8.1.1 Avantages et inconvénients d'un système PV :

Avantages :

- Son carburant est gratuit
- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.
- Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité.
- L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance.
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.

Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Dépendance des conditions climatiques.
- Variabilité du rendement selon la géographie.
- Un coût d'investissement initial élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%). [23]

III.8.2 Système éolien : L'éolienne est un dispositif conçu pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales de l'éolienne, ce qui entraîne la rotation d'un rotor. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique. Les éoliennes sont principalement utilisées pour produire de l'électricité et font partie des sources d'énergie renouvelables. Elles contribuent à la transition vers des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement. [24]

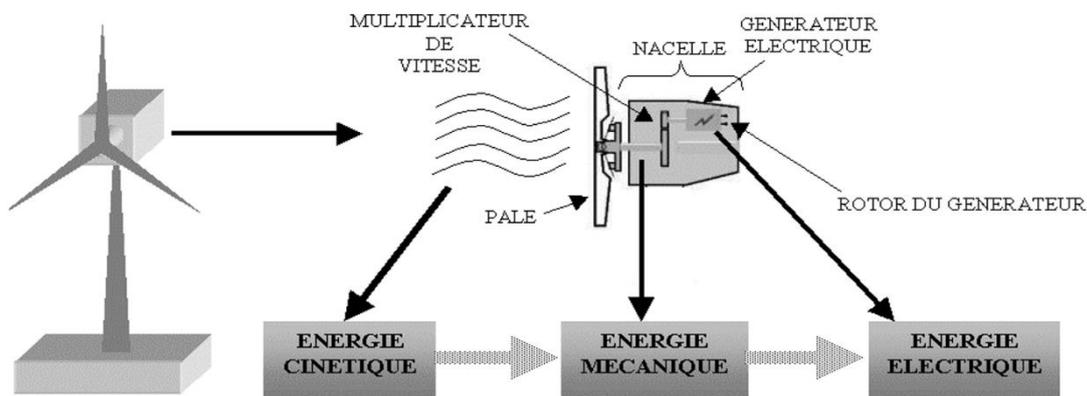


Figure III.5 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

III.8.2.1 Les types d'éoliennes : Les éoliennes se divisent en deux grandes familles :

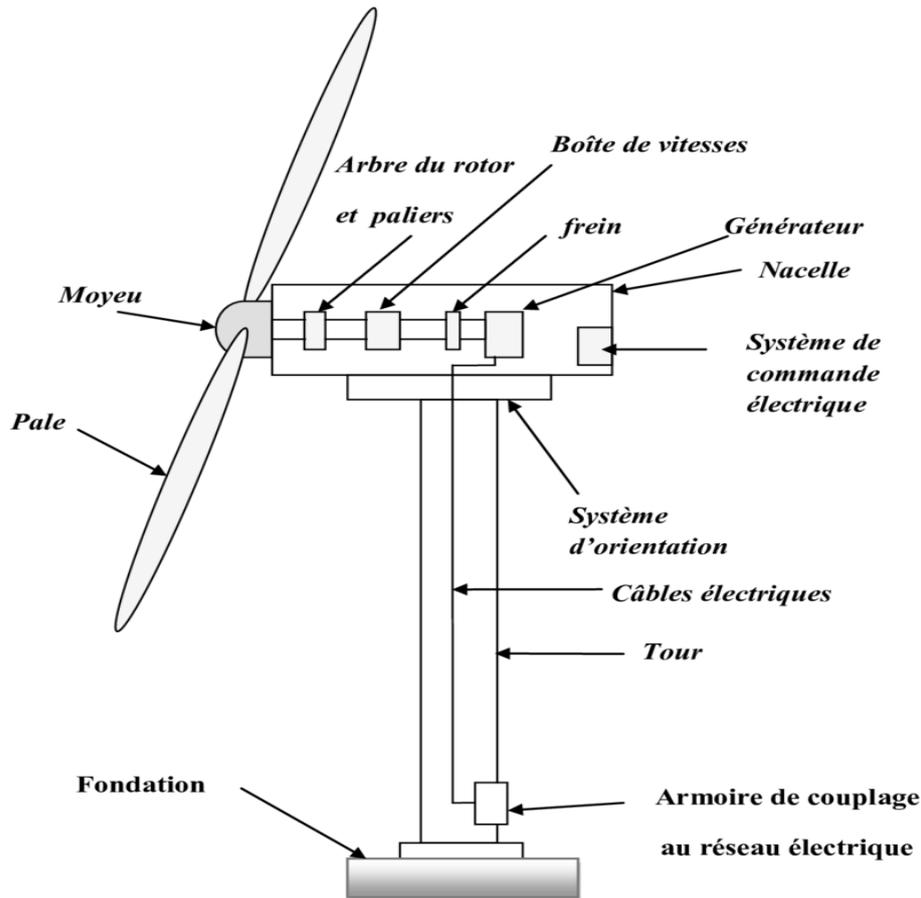
- **Les éoliennes à axe horizontal :** Ce sont les machines les plus couramment utilisées en ce moment en raison de :

Leur efficacité dépasse celle de toutes les autres machines et leur conception est très simple. Les éoliennes à axe horizontal sont désignées car l'axe de rotation du rotor est horizontal, en parallèle avec la direction du vent. En règle générale, elles sont équipées d'hélices à deux ou trois pales.

- **Les éoliennes à axes verticaux :** Les capteurs utilisent un axe de rotation vertical et perpendiculaire à la direction du vent, ce qui en fait les premières structures conçues pour générer de l'électricité. Elles ont l'avantage d'être situées au sol, avec les organes de commande et le générateur, ce qui les rend facilement accessibles. Elles conviennent à

toutes les conditions météorologiques et ne requièrent pas de dispositif d'orientation. [25]

III.8.2.2 Composants d'un système éolien :



[26]

Figure III.6 : Les composantes de l'aérogénérateur

III.8.2.4 Avantages et inconvénients d'un système éolien :

Avantages :

- L'éolien est une source d'énergie renouvelable qui ne requiert aucun carburant, ne génère pas de gaz à effet de serre, ne génère pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité sans dégrader les milieux naturels (pas de dégradation de la qualité de l'air, pas de pollution des eaux et des sols).

- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.

Inconvénients :

- L'aménagement d'un parc éolien requiert des années et des années d'études et d'analyses avant sa construction. Les spécialistes doivent faire de nombreuses études et analyses pour répondre aux démarches administratives et respecter les nombreuses règles, ce qui fait que le nombre de zones possibles est fortement affaibli.
- L'énergie éolienne est une énergie irréversible c'est-à-dire qu'elle est intermittente, sans vent, il n'y a pas de rendement. Ainsi, elle est influencée par la topologie du site (les reliefs du sol), les conditions météorologiques et l'environnement dans lequel se trouve le parc.
- Les éoliennes peuvent aussi s'avérer dangereuses envers la faune : la rotation des pales crée un vortex qui aspire de l'air (par exemple, comme un ventilateur qui marcherait à l'envers). Cette aspiration causerait tort aux oiseaux volants à proximité car ils pourraient être attirés voire tués par les pales (ce fut le cas dans certains parcs éoliens). Elles ne doivent pas être placées sur un axe de migration des oiseaux. [27]

III.8.3 Réseau électrique :

Dans ce travail, nous avons utilisé le réseau électrique **Sonalgaz**, qui est considéré comme source de sécurité pour le système hybride. Il permet de remplacer le solaire ou l'éolien dans le cas où le solaire ou l'éolien est insuffisant. Ainsi, Ce réseau intervient comme secours au système hybride en cas de problème.

III.8.3.1 Avantages et inconvénients de réseau électrique Sonalgaz :

Avantages :

- Protection système hybride.
- Disponible toute la journée.

Inconvénients :

- Energie fossiles.
- Une énergie difficile à stocker.

III.9 Conclusion

L'énergie renouvelable représente un élément crucial de notre avenir énergétique, offrant des perspectives de développement prometteuses. Les ressources telles que le soleil, la biomasse et l'éolien fournissent des sources d'énergie durables, soutenues par des avancées technologiques constantes. En particulier, l'énergie solaire et la biomasse jouent un rôle essentiel dans le refroidissement en produisant de l'électricité, qui est ensuite utilisée dans divers secteurs tels que la climatisation et les chambres froides. Cette utilisation contribue non seulement à répondre aux besoins de refroidissement, mais également à amortir les coûts élevés de l'électricité.

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système d'énergie hybride (S.E.H) qui combine deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes photovoltaïques et les systèmes éoliens, et un système de secours (réseau électrique SONALGAZ)

Pour garantir un approvisionnement optimal de la chambre froide grâce à un système hybride, il est crucial de choisir un fluide frigorigène performant qui démontre une efficacité éprouvée dans les systèmes de réfrigération. Dans ce but, les liquides frigorifiques sont étudiés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Résultats et
discussions

IV.1 Introduction :

Dans ce travail, on examine les résultats de certains fluides réfrigérants dans la chambre froide négative et positive, ainsi que leurs conséquences environnementales.

Les fluides réfrigérants étudiés sont : R22, R32, R134a, R152a, R227, R404A.

Pour cela un logiciel de commerce SOLKANE développé par l'entreprise allemande Solvay Fluor GmbH Hanover a été utilisé.

Les résultats ainsi obtenus sont présentés sous formes des tableaux et des diagrammes.

IV.2 Objectif de travail :

L'objectif principal de cette étude est :

- Comparaison de coefficient de performance de chaque fluide pour bien choisir un liquide performant utilisable dans une chambre froide située dans une région saharienne alimenté par **un Système Hybride photovoltaïque-éolien** (système étudié en chapitre III)
- L'évaluation des performances des fluides frigorigènes en termes de thermodynamique pour comprendre leur efficacité dans les systèmes de réfrigération.

IV.3 Présentation de région d'étude :

Sachant que notre étude a été désirée au sud algérien, on a choisi la ville de Biskra comme un site d'étude.

La wilaya de Biskra est située dans la partie occidentale du nord d'Algérie central, entre deux pôles urbains importants, Alger et Annaba. Elle est limitée au nord par Batna, au sud par la wilaya de Djelfa et d'Oued Souf, à l'ouest par M'silla à l'est par Khenchela. Elle s'étend sur une superficie de 21671,20 km².

Notre site a les coordonnées suivantes :

- Latitude : 34° 51' 1.37" N
- Longitude : 5° 43' 40.98" E
- L'altitude par rapport au niveau de la mer : 120 m

Biskra affiche une température annuelle moyenne de 21.8°C. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 141 mm.

IV.4 Présentation du logiciel SOLKANE 8 :

Ce logiciel est utilisé pour :

- Calculer les propriétés de transport de tous les liquides frigorigènes, les paramètres thermodynamiques des substances. Et afficher le diagramme P. H ou T. S des fluides.
- Assurer dans une fenêtre d'aide de Windows, une information complète sur les fluides frigorigènes SOLKANE 8 depuis les propriétés physiques jusqu'au transport et à la garniture. [28]

IV.5 Comment sélectionner les fluides frigorigènes :

Pour le calcul des propriétés d'une substance et des procédés cycliques de nombreux Fluides frigorigènes de la gamme de produits SOLKANE. Il existe plusieurs méthodes pour Choisir le fluide frigorigène dont on a besoin.

Méthode 1 : par activation du bouton gauche de la souris

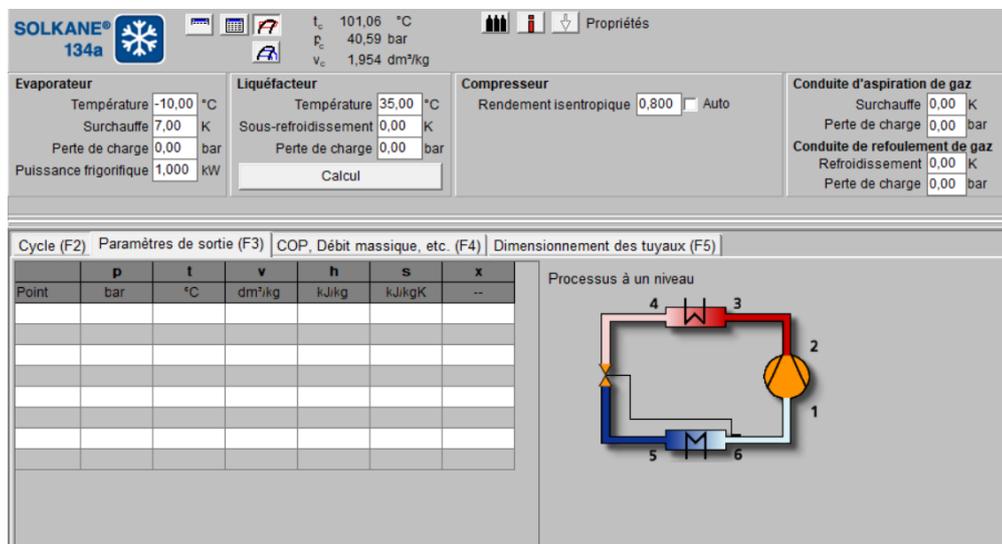


Figure IV.1 : les caractéristiques thermo physique du fluide choisis.

Méthode 2 : à l'aide du menu principal.

R22	R23	R32	R123	R124	R125	R134a	R143a	R152a
R227	R365mfc	R404A	R407A	R407C	R409A	R410A	R507	
SES36	S22L	S22M	R11	R12	R502	R13B1	?	

Figure IV.2 : Liste des fluides frigorigènes.

Méthode 3 :

On sélectionne le fluide frigorigène dont on a besoin à partir de la liste de fenêtres dans le menu fenêtre, pour cela une fenêtre doit déjà être ouverte.

Méthode 4 :

En Double-clic sur le symbole (fenêtre réduite) pour le fluide frigorigène dont on a besoin (bouton gauche de la souris), pour ce faire, une fenêtre doit déjà être ouverte.

[28]

IV.6 Les liquides frigorigènes

Selon les normes de protection d'environnement GWP (Global Warming Potential) et ODP (Ozone Depletion Potential), On résume ce tableau 1, les fluides interdits à la production et à l'utilisation :

Fréons	R22	R32	R134a	R404a	R407a	R410a	R11	R12
GWP	1500	650	1300	3260	1770	2100	4750	10890
ODP	0.005	0	0	0	0	0	1	1

Tableau IV.1 : ODP et GWP des liquides frigorifiques.

IV.7 Présentation des résultats de calcul du logiciel : [28]

Point		*Calcule les points d'état singuliers. Les points calculés dépendent des options complémentaires : vapeur humide*
Singulier		ou 'surchauffée', données de 'pression' ou 'température. Introduites.
Table		*Calcule les propriétés thermodynamiques spécifiées où elles sont présentées sous forme de table.
Vapeur humide		* Permet d'entrer paramètres de la substance en état saturé* (Liquide à ébullition et vapeur saturée) pour calculer les Points singuliers ou propriétés thermodynamiques.
Surchauffe		* Permet d'entrer paramètres de la vapeur surchauffée* (état Gazeux) pour calculer le point singulier ou les propriétés Thermodynamiques.
Cycle		*Permet d'Ouvrir une fenêtre pour le calcul des procédés cyclique.
Propriétés		*Permet d 'Ouvrir la boîte de dialogue pour choisir les Paramètres de calcul pour un point singulier ou propriété Thermodynamique.
Sous-refroidi		Entrer les 'paramètres du liquide sous-refroidi pour

IV.8 Présentation des paramètres qui affiche les résultats.

Depuis 1987, le protocole de Montréal impose une nouvelle réglementation en termes d'utilisation des fluides frigorigènes. Pour l'application de ce protocole dans de bonnes conditions techniques et économiques, il est indispensable de connaître et d'évaluer l'impact de ces fluides réfrigérants. Pour cela, on se propose d'évaluer l'impact de 5 réfrigérants dans les mêmes conditions de fonctionnement d'une machine frigorifique ayant les caractéristiques suivantes :

- Puissance frigorifique utile nécessaire : $P_{\text{frigorifique}} = 100 \text{ kW}$.
- Température de condensation = 35°C .
- Température d'évaporation ou d'ébullition = -10°C .
- Sous-refroidissement = 5°C .
- Surchauffe = 7°C .
- Rendement du compresseur comp = $0,80$.

On suppose que les pertes de charge et les pertes thermiques sont négligeables au niveau des conduites.

Evaporateur Température <input type="text" value="-10,00"/> °C Surchauffe <input type="text" value="7,00"/> K Perte de charge <input type="text" value="0,00"/> bar Puissance frigorifique <input type="text" value="100"/> kW	Liquéfacteur Température <input type="text" value="35,00"/> °C Sous-refroidissement <input type="text" value="5,00"/> K Perte de charge <input type="text" value="0,00"/> bar <input type="button" value="Calcul"/>	Compresseur Rendement isentropique <input type="text" value="0,800"/> <input type="checkbox"/> Auto	Conduite d'aspiration de gaz Surchauffe <input type="text" value="0,00"/> K Perte de charge <input type="text" value="0,00"/> bar Conduite de refoulement de gaz Refroidissement <input type="text" value="0,00"/> K Perte de charge <input type="text" value="0,00"/> bar
---	--	---	---

Figure IV.3 : les caractéristiques utilisées.

IV.9 Analyse énergétique des fréons :

Etude de R22 :

Puissances Processus à un niveau			
Evaporateur	100 kW	Rapport de compression	3,82
Liquéfacteur	126 kW	Différence de pression	10,00 bar
Compresseur	25,7 kW	Débit massique	590,9 g/s
		Débit vol. (à l'aspiration)	143,6 m ³ /h
		Capacité volumétrique	2506 kJ/m ³
Conduite d'aspiration de gaz	0,000 kW	COP	3,89
Conduite de refoulement de gaz	0,000 kW		

Figure IV.4 : les résultats affichés pour le réfrigérant R22.

D'après les résultats affichés par Solkane 8 sur le réfrigérant R22 on déduit que :

- **Rapport de compression** : 3.82
- **Débit massique** : 590.9 g/s
- **Différence de pression** : 10 bar
- **Débit volumétrique a l'aspiration** : 143.6 m³/h
- **Capacité volumétrique** : 2506 kJ/m³
- **Cop** : 3.89

	p	t	v	h	s	x
Point	bar	°C	dm ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	--
1	3,55	-3,00	67,53	405,99	1,7839	
2s	13,55	63,75	20,47	440,76	1,7839	
2	13,55	74,07	21,50	449,45	1,8093	
3	13,55	74,07	21,50	449,44	1,8093	
3'	13,55	35,00	17,25	415,31	1,7049	
3"4"m	13,55	35,00	9,06	329,22	1,4256	
4'	13,55	35,00	0,87	243,14	1,1462	
4	13,55	30,00	0,85	236,75	1,1258	
5	3,55	-10,00	15,43	236,75	1,1411	0,228
5"6"m	3,55	-10,00	40,30	318,92	1,4533	
6"	3,55	-10,00	65,18	401,09	1,7655	
6	3,55	-3,00	67,53	405,99	1,7839	

Figure IV.5 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R22.

1	Compresseur, aspiration / conduite d'arrivée des gaz, en aval
2s	Compresseur, point final de la compression isentropique
2	Compresseur, point final de la compression et conduite d'évacuation du gaz, en amont
3	Condenseur, en amont / conduite d'évacuation du gaz, en aval
3''	Condenseur, point de rosée (température du point de rosée $t_{3''}$ = température de référence)
3''4'm	Condenseur, valeur moyenne des points 3'' et 4'
4'	Condenseur, point d'ébullition
4	Condenseur, en aval / détendeur, en amont
5	Evaporateur, en aval / détendeur, en amont
56''m	Evaporateur, valeur moyenne des points 5 et 6''
6''	Evaporateur, point de rosée (température de point de rosée $t_{6''}$ = température de référence)

Tableau IV.2 : Les abréviations du tableau de paramètres.

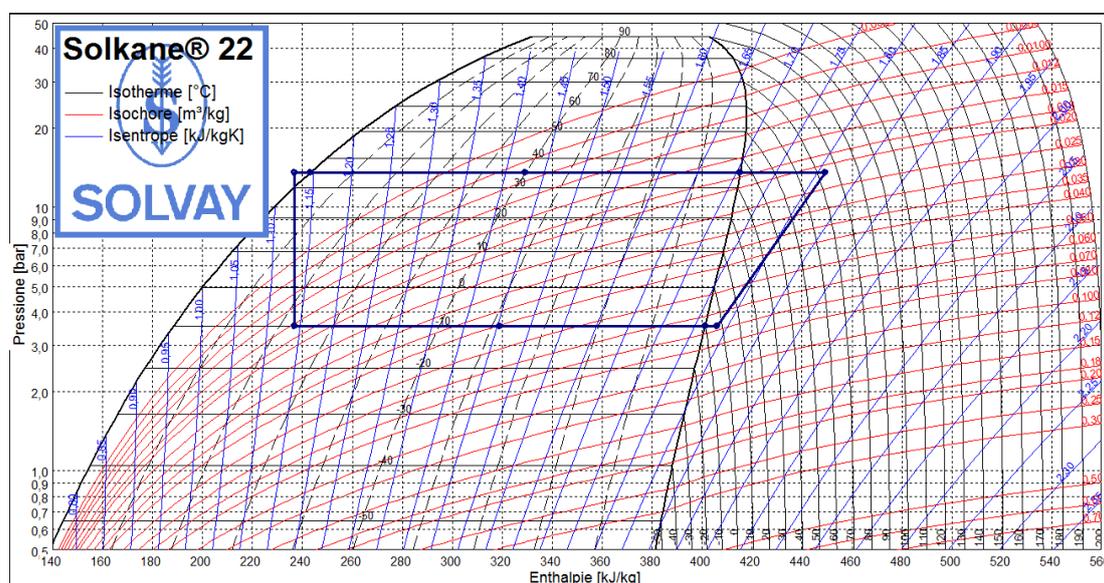


Figure IV.6 : diagramme P-H du cycle simple R22.

Etude de R134a

Puissances Processus à un niveau			
Evaporateur	100 kW	Rapport de compression	4,42
Liquéfacteur	126 kW	Différence de pression	6,86 bar
Compresseur	25,6 kW	Débit massique	638,4 g/s
		Débit vol. (à l'aspiration)	236,6 m³
		Capacité volumétrique	1521 kJ/
Conduite d'aspiration de gaz	0,000 kW	COP	3,91
Conduite de refoulement de gaz	0,000 kW		

Figure IV.7 : les résultats affichés pour le réfrigérant R134a.

D'après les résultats affichés par Solkane 8 sur le réfrigérant R134a on déduit que :

- **Rapport de compression** : 4.42
- **Débit massique** : 638.4 g/s
- **Différence de pression** : 6.86 bar
- **Débit volumétrique a l'aspiration** : 236.6 m³/h
- **Capacité volumétrique** : 1521 kJ/m³
- **Cop** : 3.91

Point	p bar	t °C	v dm ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	x --
1	2,01	-3,00	102,96	398,48	1,7552	
2s	8,87	47,69	24,92	430,53	1,7552	
2	8,87	55,39	25,98	438,54	1,7799	
3	8,87	55,39	25,98	438,54	1,7799	
3'	8,87	35,00	23,04	417,07	1,7124	
3"4"m	8,87	35,00	11,95	333,08	1,4394	
4'	8,87	35,00	0,86	249,08	1,1663	
4	8,87	30,00	0,84	241,83	1,1429	
5	2,01	-10,00	27,23	241,83	1,1603	0,268
56"m	2,01	-10,00	63,39	317,21	1,4467	
6"	2,01	-10,00	99,54	392,58	1,7331	
6	2,01	-3,00	102,96	398,48	1,7552	

Figure IV.8 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R134a.

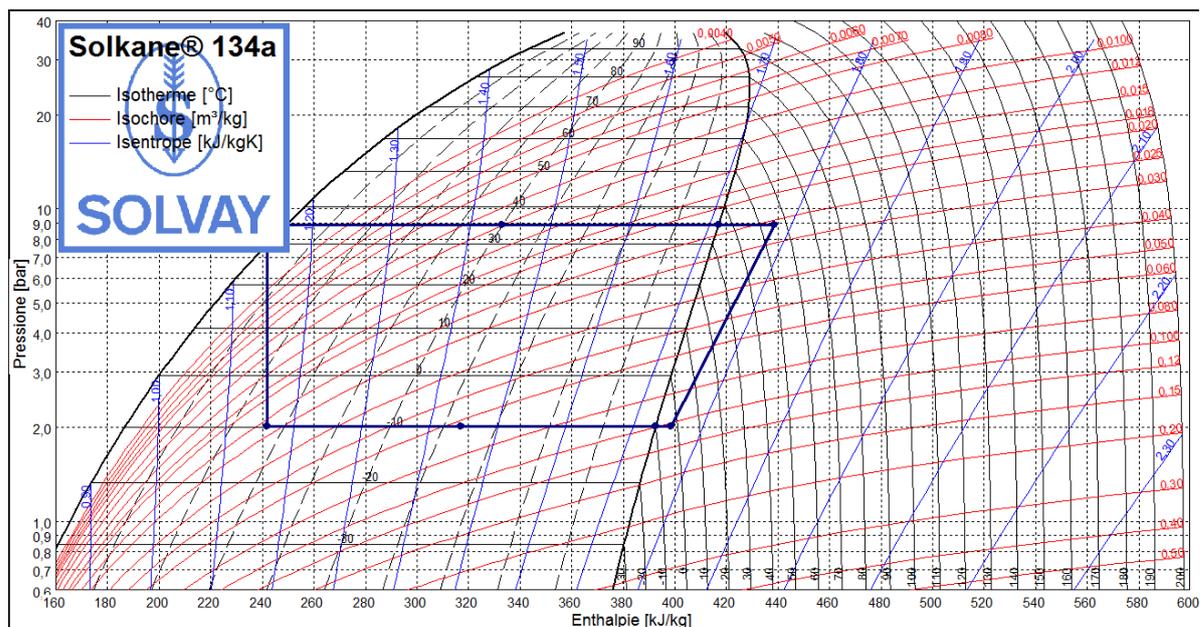


Figure IV.9 : diagramme P-H du cycle simple R134a.

Etude de R404A

Puissances Processus à un niveau			
Evaporateur	100 kW	Rapport de compression	3,73
Liquéfacteur	128 kW	Différence de pression	11,74 bar
Compresseur	27,5 kW	Débit massique	807,1 g/s
		Débit vol. (à l'aspiration)	138,1 m ³ /h
		Capacité volumétrique	2606 kJ/m ³
Conduite d'aspiration de gaz	0,000 kW	COP	3,63
Conduite de refoulement de gaz	0,000 kW		

Figure IV.10 : les résultats affichés pour le réfrigérant R404a.

D'après les résultats affichés par Solkane 8 sur le réfrigérant R404a on déduit que :

- **Rapport de compression** : 3.73
- **Débit massique** : 807.1 g/s
- **Différence de pression** : 11.74 bar
- **Débit volumétrique a l'aspiration** : 138.1 m³/h
- **Capacité volumétrique** : 2606 kJ/m³
- **Cop** : 3.63

	p	t	v	h	s	x
Point	bar	°C	dm ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	--
1	4,31	-3,00	47,54	367,18	1,6371	
2s	16,05	46,93	12,79	394,46	1,6371	
2	16,05	52,60	13,36	401,27	1,6582	
3	16,05	52,60	13,36	401,27	1,6582	
3'	16,05	35,00	11,43	379,22	1,5886	
3"4'm	16,05	34,82	6,22	315,14	1,3803	
4'	16,05	34,64	1,01	251,05	1,1720	
4	16,05	29,64	0,98	243,28	1,1464	
5	4,31	-10,38	15,61	243,28	1,1665	0,330
56"m	4,31	-10,19	30,63	301,98	1,3896	
6"	4,31	-10,00	45,65	360,69	1,6127	
6	4,31	-3,00	47,54	367,18	1,6371	

Figure IV.11 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R404a.

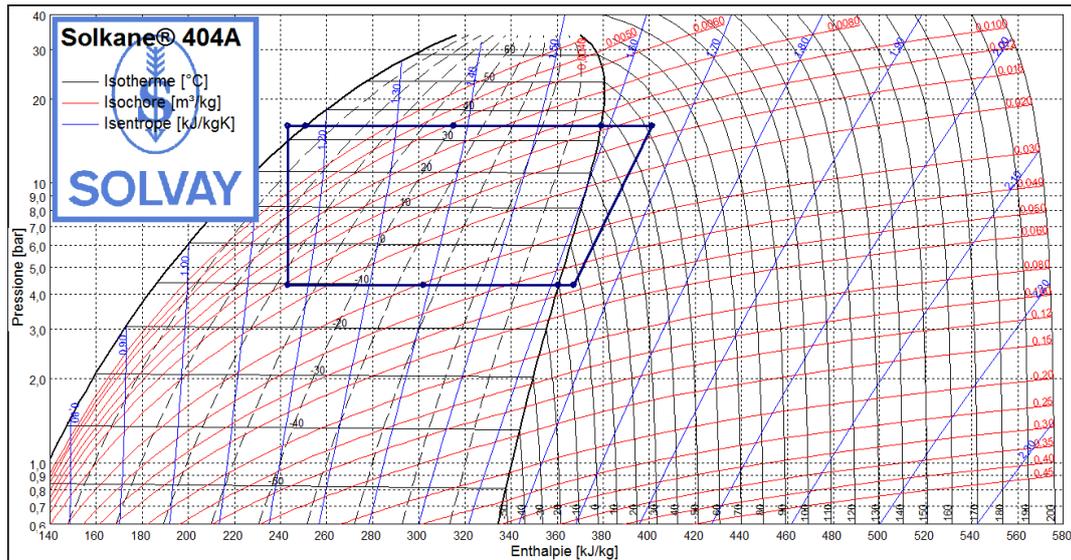


Figure IV.12 : diagramme P-H du cycle simple R404a.

Etude de R32

Evaporateur	100 kW	Rapport de compression	3,76
Liquéfacteur	127 kW	Différence de pression	16,07 bar
Compresseur	26,9 kW	Débit massique	376,7 g/s
		Débit vol. (à l'aspiration)	89,21 m ³ /h
		Capacité volumétrique	4036 kJ/m ³
Conduite d'aspiration de gaz	0,000 kW	COP	3,72
Conduite de refoulement de gaz	0,000 kW		

Figure IV.13 : les résultats affichés pour le réfrigérant R32.

D'après les résultats affichés par Solkane 8 sur le réfrigérant R32 on déduit que :

- **Rapport de compression** : 3.76
- **Débit massique** : 376.7 g/s
- **Différence de pression** : 16.07 bar
- **Débit volumétrique a l'aspiration** : 89.21 m³/h
- **Capacité volumétrique** : 4036 kJ/m³
- **Cop** : 3.72

	p	t	v	h	s	x
Point	bar	°C	dm ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	--
1	5,83	-3,00	65,78	520,62	2,2197	
2s	21,90	80,76	21,82	577,66	2,2197	
2	21,90	92,69	23,08	591,91	2,2593	
3	21,90	92,69	23,08	591,91	2,2593	
3'	21,90	35,00	15,80	513,93	2,0261	
3"4'm	21,90	35,00	8,44	389,50	1,6223	
4'	21,90	35,00	1,09	265,07	1,2185	
4	21,90	30,00	1,06	255,16	1,1870	
5	5,83	-10,00	14,53	255,16	1,2113	0,219
56"m	5,83	-10,00	38,81	384,24	1,7018	
6"	5,83	-10,00	63,09	513,31	2,1923	
6	5,83	-3,00	65,78	520,62	2,2197	

Figure IV.14 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R32.

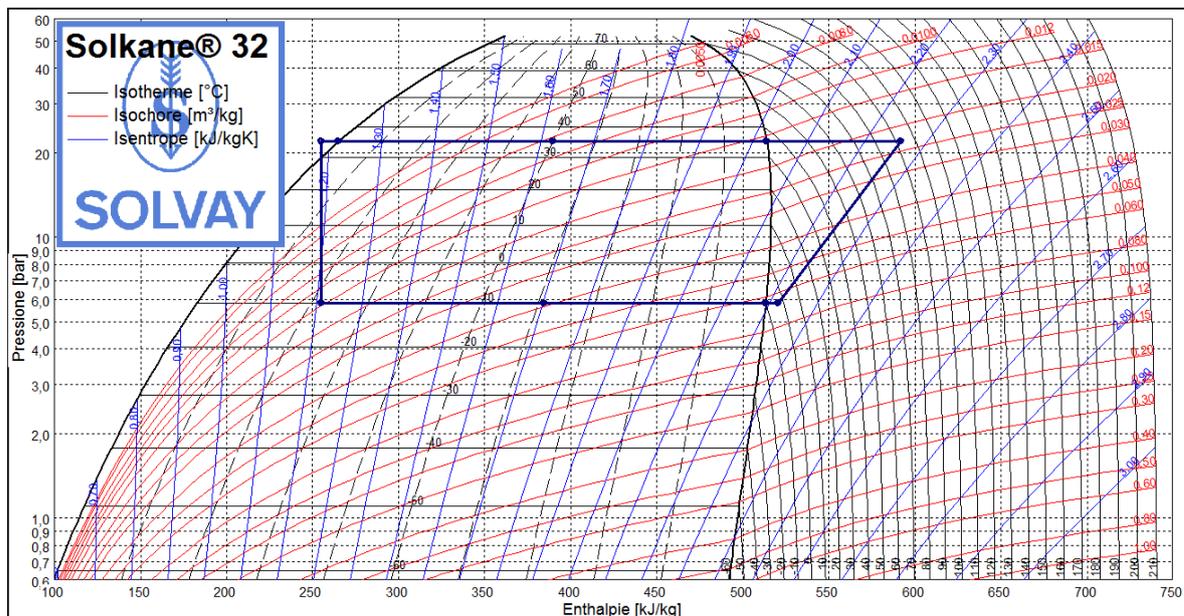


Figure IV.15 : diagramme P-H du cycle simple R32.

Etude de R227

Evaporateur	100 kW	Rapport de compression	4,60
Liquéfacteur	127 kW	Différence de pression	4,79 bar
Compresseur	27,0 kW	Débit massique	1131,4 g/s
		Débit vol. (à l'aspiration)	383,7 m ³ /h
		Capacité volumétrique	938 kJ/m ³
Conduite d'aspiration de gaz	0,000 kW	COP	3,70
Conduite de refoulement de gaz	0,000 kW		

Figure IV.16 : les résultats affichés pour le réfrigérant R22.

D'après les résultats affichés par Solkane 8 sur le réfrigérant R227 on déduit que :

- **Rapport de compression** : 4.60
- **Débit massique** : 1131.4 g/s
- **Différence de pression** : 4.79 bar
- **Débit volumétrique a l'aspiration** : 383.7 m³/h
- **Capacité volumétrique** : 938 kJ/m³
- **Cop** : 3.70

Point	p	t	v	h	s	x
	bar	°C	dm ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	--
1	1,33	-3,00	94,21	323,20	1,4689	
2s	6,11	35,00	20,48	342,31	1,4689	
2	6,11	35,77	20,57	347,09	1,4844	
3	6,11	35,77	20,57	347,09	1,4844	
3'	6,11	35,00	20,48	346,37	1,4821	
3"4'm	6,11	35,00	10,61	293,62	1,3109	
4'	6,11	35,00	0,74	240,87	1,1397	
4	6,11	30,00	0,73	234,82	1,1201	
5	1,33	-10,00	32,90	234,82	1,1333	0,356
56"m	1,33	-10,00	62,06	276,30	1,2909	
6"	1,33	-10,00	91,22	317,79	1,4486	
6	1,33	-3,00	94,21	323,20	1,4689	

Figure IV.17 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R227.

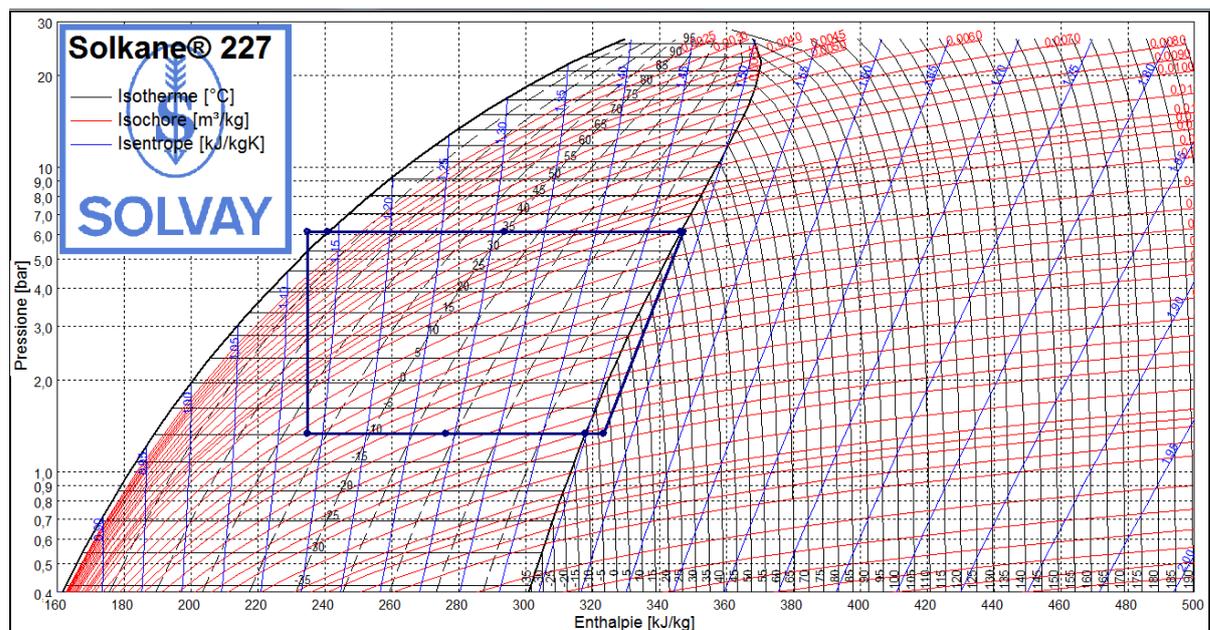


Figure IV.18 : diagramme P-H du cycle simple R227.

Etude de R152a

Evaporateur	100 kW	Rapport de compression	4,37
Liquéfacteur	125 kW	Différence de pression	6,12 bar
Compresseur	25,0 kW	Débit massique	393,5 g/s
		Débit vol. (à l'aspiration)	250,3 m ³ /h
		Capacité volumétrique	1438 kJ/m ³
Conduite d'aspiration de gaz	0,000 kW	COP	4,00
Conduite de refoulement de gaz	0,000 kW		

Figure IV.19 : les résultats affichés pour le réfrigérant R22.

D'après les résultats affichés par Solkane 8 sur le réfrigérant R152a on déduit que :

- **Rapport de compression** : 4.37
- **Débit massique** : 393.5 g/s
- **Différence de pression** : 6.12 bar
- **Débit volumétrique a l'aspiration** : 250.3 m³/h
- **Capacité volumétrique** : 1438 kJ/m³
- **Cop** : 4.00

	p	t	v	h	s	x
Point	bar	°C	dm ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	--
1	1,81	-3,00	176,69	507,39	2,5217	
2s	7,94	57,41	45,87	558,19	2,5217	
2	7,94	67,27	47,99	570,89	2,5596	
3	7,94	67,27	47,99	570,89	2,5596	
3'	7,94	35,00	40,63	528,84	2,4298	
3"4'm	7,94	35,00	20,89	395,64	1,9975	
4'	7,94	35,00	1,15	262,43	1,5652	
4	7,94	30,00	1,13	253,26	1,5356	
5	1,81	-10,00	38,79	253,26	1,5564	0,222
56"m	1,81	-10,00	104,88	376,67	2,0253	
6"	1,81	-10,00	170,97	500,08	2,4943	
6	1,81	-3,00	176,69	507,39	2,5217	

Figure IV.20 : paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R152a.

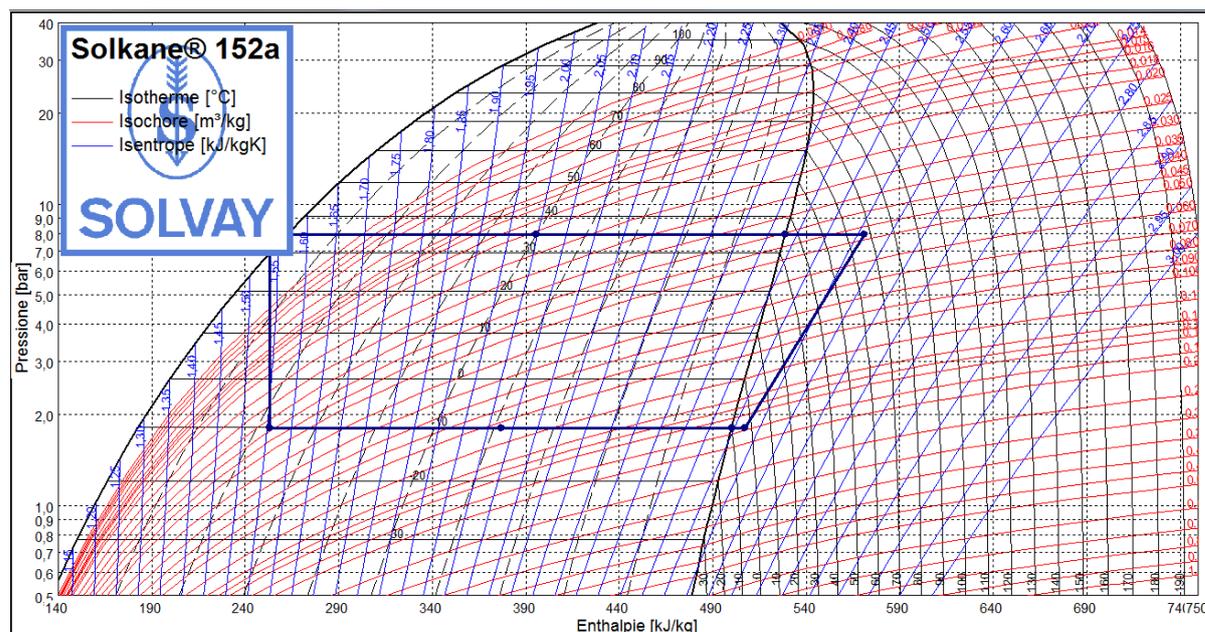


Figure IV.21 : diagramme P-H du cycle simple R152a.

IV.10 l'influence sur Cop :

Fréon	R22	R134a	R404a	R152a	R32	R227
COP	3.89	3.91	3.63	4.00	3.72	3.70
GWP	1500	1300	3260	140	650	3220
ODP	0.005	0	0	0	0	0

Tableau IV.3 : Résultats sur les performances des fluides frigorigènes examinés et leur facteur d'impact sur la couche d'ozone (ODP) et de réchauffement climatique (GWP).

IV.11 Remarque et comparaison :

On remarque que pour les mêmes conditions de fonctionnement et durant la même durée, le coefficient de performances du R404A qui est de 3,63 est le plus faible contrairement à celui du R152a qui est de 4.00 qui est à son tour le plus élevé et d'après le tableau des fluides frigorigènes il a le plus faible GWP et ODP négatif donc le meilleur COP est celui de fréon (R152).

IV.12 Conclusion :

Lors du choix du gaz réfrigérant pour les équipements de réfrigération alimentés par un système hybride, plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour garantir une consommation optimale d'énergie et un rendement élevé, parmi ces facteurs on a le coefficient de performance (COP) qui représente l'efficacité énergétique du système de réfrigération.

Et selon les résultats des simulations menées sur les 6 fréons pour des paramètres identiques (R22, R134a, R404A, R32, R152a, R227), en tenant compte du tableau répertoriant les fréons autorisés et ceux jugés nocifs pour l'environnement, on constate que pour un même mélange d'hydrofluorocarbures comme le R32 et le R152a, leur (GWP) est plus faible, ce qui signifie que ce dernier est le plus utile en utilisation d'une chambre froide alimenté par un système hybride (étudié en chapitre III).

En tenant compte des contraintes liées à l'environnement, c.à.d. en s'intéressant aux indices d'impact ODP et GWP, on déduit que le réfrigérants **R152a est le fluide le plus approprié parmi les fluides étudiés** du fait qu'il a un ODP nul et un GWP le plus faible qui est de 140.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Le but de ce travail est présenté un nouveau système de la production de froid à partir des énergies renouvelables (solaire-éolien) et choisir le meilleur réfrigérant pour l'installation frigorifique et leur impact sur l'environnement, c'est-à-dire leur impact sur la couche d'ozone et le réchauffement climatique, c'est pour cela nous ferons des calculs et comparaison entre les performances des différents fluides frigorigènes.

Pour cela, nous avons d'abord entrepris de comprendre l'histoire et les avancées antérieures dans le domaine de la réfrigération, y compris les contributions des chercheurs renommés.

Ensuite, nous avons mené une étude théorique approfondie sur la thermodynamique, les principes des chambres froides, des machines frigorifiques et des systèmes d'isolation.

Dans un troisième temps, nous avons examiné en détail le fonctionnement théorique du système hybride (solaire-éolien). Nous avons souligné le potentiel du photovoltaïque comme solution d'avenir, offrant une production d'énergie propre sans recours aux combustibles fossiles, ce qui contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la pollution atmosphérique. L'énergie éolienne a également été considérée comme une réponse viable à la demande énergétique croissante avec une faible empreinte carbone.

Dans cette étude, des expériences ont été menées pour étudier six fluides frigorigènes.

Les fluides frigorigènes étudiés sont : R22, R32, R134a, R152a, R227, R404A.

En raison des contraintes liées à l'environnement, le fluide R152a est le plus adapté du fait des contraintes environnementales (ODP=0, GWP=140) et par rapport leur cop (COP = 4.00)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] <https://www.techno-science.net/definition/3334.html>
- [2] <https://www.superprof.fr/ressources/physique-chimie/physique-chimie-tous-niveaux/science-chaleur-physique.html>
- [3] https://www.researchgate.net/publication/341901392_Les_Transformations_Thermodynamiques
- [4] https://fsm.rnu.tn/useruploads/cours/ulpcsm/chimie/chimther/lexique/lexique_e.htm#:~:text=Endothermique%20et%20exothermique%20%3A,ext%C3%A9rieur%2C%20la%20transformation%20est%20exothermique.
- [5] <https://www.intarcon.com/fr/chambres-froides-positives-et-negatives/>
- [6] <https://www.dagard.com/blog/chambres-froides/chambre-froide-nega-positi/>
- [7] <https://travaux.mondevis.com/chambre-froide/#:~:text=Positive%20%3A%20c'est%2D%C3%A0,articles%20stock%C3%A9s%20%20%C3%A0%20l'int%C3%A9rieur.>
- [8] <https://www.nelinkia.com/blog/lexique/chambre-froide.html>
- [9] <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/machine-frigorifique>
- [10] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/production-de-froid-mecanique-42211210/machines-frigorifiques-industrielles-be9743/>
- [11] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/froid-cryogenie-applications-industrielles-et-peripheriques-42596210/applications-industrielles-du-froid-be9756/>
- [12] <https://www.cairn-sciences.info/formulaire-du-froid--9782100708963-page-113.htm#:~:text=Il%20existe%20trois%20moyens%20principaux%20de%20production%20du,besoins%20industriels%20en%20r%C3%A9frig%C3%A9ration%2C%20congélation%20et%20conditionnement%20d%E2%80%99air.>
- [13] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_frigorifique
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_performance

[15] <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/thermique-fluide-frigorigene-5754/>

[16] <https://www.expertise-renovation.com/isolation/isolation-froid/>

[17] Les énergies renouvelables : qu'est-ce que c'est ? | Nations Unies

[18] <https://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/der/energie/content/renewable.html>

[19] <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/150680>

[20] <https://vivre-electrique.fr/electricite-froid-et-energies-renouvelables-en-france/>

[21] https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_hybride_d%27%C3%A9nergie

[22] <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/elements>

[23] <https://www.e2n-solaire.fr/les-inconvenients-du-photovoltaique-un-regard-realiste-et->

[nuance/#:~:text=Le%20premier%20inconv%C3%A9nient%20majeur%20du,rendement%20d'une%20installation%20photovolta%C3%AFque.](#)

[24] <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fdspace.ummt0.dz%2Fbitstreams%2F52ed24b5-ff9b-4ca1-a0dc->

[a0fcfb4342f4%2Fdownload&psig=AOvVaw2OxTtJJvLd4LWwiHslGLD&ust=1715624256143000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBIQjRxqFwoTCMjBls3ciIYDFQAAAAAdAAAAABAa](#)

[25] <https://www.comptoireolien.fr/les-differents-types-de-oliennes.html#d92d9e3d9e26916817aa67089173276d>

[26] https://www.researchgate.net/figure/Composants-modernes-de-oliennes_fig4_330225602

[27] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/avantages-inconvenients-eolienne/>

[28]

Chouiref soheir/ bensaber ahmed elies. 2023/2024. *Etude chambre froide positive*. Ain temouchent : s.n., 2023/2024.