



جامعة سعد دحلب بليدة 1
Université Saad Dahleb Blida 1
Faculté De Technologie
Département De Mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique

En Génie Mécanique

Option : Installation Énergétique et Turbomachine (IET)

Thème

Amélioration De l'Efficacité d'un Climatiseur Split Par l'Évaporation Adiabatique

Réalisé par :

BOUTAIB Abd Raouf Taha

Encadré par :

MOKRANE Mehdi

MRB

UDES

Encadreur

KETFI Omar

MCA

USDB

Co-Encadreur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien mon Projet de Fin d'Études.

Ce travail est le fruit non seulement de mes efforts personnels, mais aussi de l'aide précieuse de nombreuses personnes à qui j'adresse mes sincères remerciements.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, **MOKRANE Mehdi**, chercheur à l'Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES), pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et pour l'encadrement expérimental qu'il m'a généreusement apporté. Son accompagnement technique, ses explications claires et sa patience ont grandement enrichi la dimension pratique de ce mémoire.

Je remercie également mon Co-encadreur M. **KETFI Omar**, Chef du Département de Génie Mécanique et promoteur de ce mémoire, pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et son suivi constant tout au long de ce travail. Son expertise scientifique et sa disponibilité ont été des atouts essentiels à la réussite de cette étude.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour leurs remarques constructives qui ont permis d'en améliorer la qualité.

Enfin, je remercie l'ensemble des enseignants et du personnel administratif de la faculté pour la qualité de la formation dispensée durant mon cursus, ainsi que mes collègues et proches pour leur soutien moral et leurs encouragements constants.

Dédicace

À ma famille bien-aimée,

Dans les pages de ce mémoire se trouvent non seulement le fruit de mes efforts,
mais aussi l'écho de votre amour et de votre soutien indéfectible.

À ma mère, **BOUTAIB Hassina**,

Qui, depuis la perte de mon père, a porté le poids de nos vies avec un courage et
un amour infini. Ce travail, ce diplôme, cette étape... je te les dois. Ton
dévouement, tes sacrifices silencieux et ta force m'ont guidé jusqu'ici. Qu'Allah
te protège et t'élève toujours.

À mes sœurs : **Salsabil, Ibtihel** et ma petite lumière **Baraa**,

Votre présence, vos sourires, votre complicité sont une part de moi. Vous êtes
mes repères, ma tendresse, mon équilibre.

À **DEHIM Meriem**,

Il m'est difficile de mettre en mots ce que tu représentes pour moi. Tu es cette
présence douce et constante, ce soutien précieux qui m'a accompagné dans
chaque étape de la rédaction de ce mémoire. Ton aide, ton intelligence, ta
patience et ton amour ont fait de ce travail bien plus qu'un projet académique. Tu
fais déjà partie de mon avenir.

À **HAMMAD Boualem** et **Redouane**,

Vous êtes bien plus que des amis : vous êtes mes frères. Plus de dix années
d'amitié, de soutien moral, de confiance et de sacrifices. Sans vous, sans vos
mots, vos silences, vos conseils, je n'aurais pas tenu. Merci d'avoir toujours été
là, sans condition.

Dédicace

À mon père, **BOUTAIB Sid Ahmed**

Tu es parti il y a déjà sept ans, mais si vivant dans ma mémoire, dans mes efforts, dans chaque ligne de ce mémoire...

Tu étais un homme de principe, un homme de savoir, un homme qui croyait en l'éducation comme la plus noble des voies. Tu rêvais de me voir un jour obtenir un diplôme universitaire. Ce rêve, devenu mien, je l'ai porté avec force, parfois avec douleur, mais toujours avec l'image de ton regard fier au fond du cœur.

Ton absence m'a pesé, mais ton souvenir m'a élevé. Chaque difficulté, chaque réussite, je les ai vécues avec toi en pensée. Ce travail t'est dédié, avec tout l'amour et tout le respect d'un fils qui aurait tant voulu te voir assis au premier rang, le jour de la soutenance.

Qu'Allah t'accorde Sa miséricorde et le plus haut des paradis.

ملخص

يتناول هذا البحث تحسين كفاءة مكيف الهواء العامل بدورة الضغط في المناطق التي تتجاوز فيها درجات الحرارة 50 درجة مئوية، من خلال دمج نظام تبريد بالتبخير الأديباتي أمام المكثف. تم إجراء محاكاة عددية باستخدام برنامج TRNSYS ، إلى جانب تجربة حقيقية داخل بيت شمسي.

أظهرت النتائج أن استخدام وسادة التبريد أدى إلى خفض درجة حرارة الهواء الداخل إلى المكثف بما بين 8 و 11 درجة مئوية، مما ساهم في تقليل استهلاك الكهرباء بنسبة تصل إلى 18% في بشار و 12% في الدار البيضاء. يمثل هذا النظام حلاً فعالاً لتحسين أداء المكيف وتقليل الحمل الحراري، خاصة في المناطق الجافة

الكلمات المفتاحية: تكييف الهواء، التبخير أديباتي، كفاءة الطاقة، TRNSYS

Résumé

Ce mémoire traite de l'**amélioration de l'efficacité énergétique d'un climatiseur split** dans les zones où les températures dépassent 50 °C, par l'intégration d'un **refroidissement par évaporation adiabatique** en amont du condenseur.

Une simulation numérique sous TRNSYS a été réalisée, complétée par une expérimentation dans une maison solaire.

Les résultats montrent que l'ajout d'un pad adiabatique permet de **réduire la température de l'air entrant dans le condenseur de 8 à 11 °C**, ce qui entraîne une **baisse de la consommation électrique allant jusqu'à 18 %** à Béchar et **12 %** à Dar El Beïda.

Cette approche améliore ainsi l'efficacité globale du climatiseur, tout en réduisant la charge thermique, particulièrement dans les climats arides.

Mots-clés : Climatisation, Évaporation adiabatique, Efficacité énergétique, TRNSYS

Abstract

This thesis focuses on improving the energy efficiency of a split air conditioner in regions where temperatures exceed 50 °C, by integrating an adiabatic evaporative cooling system ahead of the condenser.

A TRNSYS numerical simulation was performed, complemented by an experimental study in a solar house.

Results show that the use of a pad cooling system reduced the condenser inlet air temperature by 8 to 11 °C, leading to a reduction in electrical consumption of up to 18% in Béchar and 12% in Dar El Beïda.

This approach significantly improves the system's overall efficiency while reducing thermal load, especially in arid climates.

Keywords: Air conditioning, Adiabatic evaporation, Energy efficiency, TRNSYS

Tables des matières

<i>Remerciement</i>	1
<i>Dédicace</i>	2
ملخص	4
Résumé.....	5
Abstract	6

Introduction générale

Introduction générale.....	15
CHAPITRE I.....	17

Généralité sur la climatisation

I.1. Introduction à la climatisation	18
I.2. L’histoire de la climatisation :.....	18
I.3. Les Fluides Frigorigènes :.....	19
I.3.1. Propriété du fluide frigorigène :	20
I.4. C’est quoi La climatisation :	21
I.5. Le but de la climatisation :	21
I.6. Les composent principal d’un climatiseur :	21
I.6.1. Compresseur :	21
I.6.2. Condenseur :	22
I.6.3. Détendeur :	23
I.6.4. L’évaporateur :	24
I.7. Principe du fonctionnement d’un climatiseur :	25
I.8. Cycle thermodynamique pour un climatiseur :	26
I.8.1. Les paramètres physiques clés d’un climatiseur :.....	27
I.8.2. Cycle Carnot :	29
I.8.3. Comparaison entre cycle Carnot et un cycle climatiseur :	30
I.8.4. Les caractéristiques du cycle climatiseur :	30
I.9. Les différents types de climatiseur :.....	31
I.9.1. Climatiseur monobloc :	31
I.9.2. Climatiseur réversible :.....	32
I.9.3. Climatiseur central :	32
I.9.4. Climatiseur split :	33
I.10. Les avantages de la climatisation split :	34
I.11. Les inconvénients de la climatisation split :	34

I.12. Importance de la climatisation dans les environnements extrêmes :	34
I.13. Défis énergétiques et environnementaux :	36
I.14. Adaptation des technologies de climatisation aux climats arides :	37
I.15. Conclusion :	38
CHAPITRE II.....	39

État de l’art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d’intégration énergétique

II.1. Introduction :	40
II.2. État de l’art sur refroidissement par évaporation adiabatique :	40
II.2.1. Refroidissement adiabatique direct :	40
II.2.2. Refroidissement adiabatique indirect :	42
II.2.3. Comparaison Structurée des Systèmes de Refroidissement Adiabatique Direct (DEC) et Indirect (IEC) :	43
II.2.4. Conditionnement d'air hybride solaire avec pré-refroidissement par évaporation :	44
II.2.5. Étude comparative des performances de refroidissement des systèmes adiabatiques utilisant de l'eau de mer et de l'eau douce :	45
II.2.6. Analyse aérodynamique et simulation CFD de plusieurs pads cellulaires pour le refroidissement évaporatif :	46
II.3. Principe de l’évaporation adiabatique :	47
II.3.1. Définition et principes physiques :	47
II.3.2. Principes physiques :	49
II.4. L’importance du système adiabatique dans le refroidissement	50
II.5. Comparaison avec les systèmes de climatisation classique :	51
II.6. Technologies et configurations des systèmes à évaporation adiabatique :	51
II.6.1. Différent méthode refroidissement par évaporation :	51
II.6.2. Matériaux et médias utilisés pour l’évaporation :	53
II.7. Objectifs de la thèse	55
II.8. Conclusion :	55
CHAPITRE III	57

Simulation et expérimentation

III.1. Introduction	58
III.2. Partie simulation	58
III.2.1. Logiciel de simulation (TRNSYS).....	58
III.2.2. Bilan Thermique :	59

III.2.3. Configuration du système simulé : Type 651-2	62
III.2.4. Description et fonctionnement du système adiabatique.....	62
III.2.5. Représentation du montage dans TRNSYS	63
III.2.6. Configuration des composants TRNSYS utilisés dans la simulation :	64
III.3. Partie expérimentale :	68
III.3.1. Maison solaire à basse consommation d'énergie	69
III.3.2. Présentation du système de climatisation testé	70
III.3.3. Description du module de refroidissement utilisé dans l'étude	71
III.3.4. Pompe submersible utilisée – Marque LEO :	71
III.3.5. Montage expérimental d'un climatiseur à évaporation	72
III.3.6. Matérielle et mesure	74
III.3.7. Description détaillée de la collecte des données expérimentales	78
III.4. Conclusion	82
CHAPITRE IV	84

Résultats et discussion

IV.1. Introduction :	85
IV.2. Présentation des systèmes simulie :.....	86
IV.2. 1 Scenario 1 : Fonctionnement de climatiseur Sans Tampon de refroidissement : .	86
IV.2. 2 Scenario 2 : Fonctionnement de climatiseur avec Tampon de refroidissement : .	90
IV.2.1. Conclusion :	98
IV.3. Partie expérimentale	99
IV.3.1. Comparaison des conditions climatiques extérieures sur deux journées consécutives	99
IV.3.2. Évolution de la température et de l'humidité de l'air sous différents modes de fonctionnement	100
IV.3.3. Cycle ON/OFF d'un climatiseur split : Analyse thermique	103
IV.3.4. Effet du tampon adiabatique sur la température de l'évaporateur	105
IV.3.5. Consommation électrique en modes sans et avec refroidissement adiabatique : .	107
IV.3.6. Analyse de l'optimisation de la consommation pour les modes 1 et 2	107
IV.3.7. Conclusion	109

Conclusion générale

Conclusion générale	111
Bibliographie	113

Liste des Figures

Figure 1: compresseur [7]	22
Figure 2: Condenseur [8]	23
Figure 3: Détendeur [21]	24
Figure 4: L'évaporateur [9]	25
Figure 5: Principe du fonctionnement d'un climatiseur [22]	26
Figure 6: Diagramme P-H représente cycle climatiseur [24].....	27
Figure 7: Changements d'états de la matière [21]	29
Figure 8: Diagrammes T-S et P-V Cycle Carnot [23].....	29
Figure 9: Climatiseur monobloc.....	31
Figure 10: Climatiseur réversible [4]	32
Figure 11: Climatiseur central [5]	33
Figure 12: Schéma pour un climatiseur split [3]	33
Figure 13: schème représente refroidissement par EAD [16]	41
Figure 14: Schème représente refroidissement par évaporation adiabatique direct [17]	42
Figure 15: Prototype de refroidissement adiabatique avec énergie solaire	45
Figure 16: Composition des quatre pads évaporatifs réaliser par G&R.....	47
Figure 17: Schéma représente refroidissement par évaporation adiabatique [11]	48
Figure 18: Diagramme psychométrique [13]	48
Figure 19: Panneau humidification [15]	53
Figure 20: Mini refroidisseur [22].....	54
Figure 21: Schéma de la configuration du système de climatisation hybride modélisé sous TRNSYS.....	62
Figure 22: Schéma fonctionnel du système de refroidissement adiabatique modélisé avec le Type 641 sous TRNSYS	63
Figure 23: Schéma du montage de simulation TRNSYS du système de climatisation avec refroidissement adiabatique.....	64
Figure 24: Configuration entre les données météorologique et le tampon de refroidissement	66
Figure 25: Configuration entre le tampon de refroidissement et le climatiseur.....	67
Figure 26: Configuration pour afficher les données	68
Figure 27: Vue extérieure de la maison solaire expérimentale de l'UDES et positionnement du climatiseur sur la façade Est.....	69

Figure 28: Photo du climatiseur split Brandt testé : (a) unité intérieure et (b) unité extérieure	70
Figure 29: Module de refroidissement par évaporation avec tampon en nid d'abeille	71
Figure 30: Pompe LEO XKP-6P	72
Figure 31: Phototype expérimental	73
Figure 32: Schéma de fonctionnement du tampon de refroidissement par évaporation	74
Figure 33: Photo de thermocouple	75
Figure 34: Data logger type Hydra 2700	76
Figure 35 : Interface graphique du data logger.	77
Figure 36: Data logger Testo 175 H1	77
Figure 37: Photo de compteur électrique utilisée.....	78
Figure 38: Banc d'essai pour l'étude thermique du climatiseur split domestique	80
Figure 39: Schéma du montage expérimental avec emplacement des capteurs de mesure sur un climatiseur hybride solaire à pré-refroidissement adiabatique.....	81
Figure 40: Température horaire sur une année a Bechar et Dar beida	87
Figure 41: Humidité relative horaire à Béchar et Dar El Beida sur une année	88
Figure 42: Consommation horaire du climatiseur à Béchar et Dar El Beïda (en kW).....	89
Figure 43: Chaleur rejetée par le condenseur (en kW)	90
Figure 44: Graphe représente la température ambiante et la température à la sortie du pad (Bechar).....	91
Figure 45: Graphe représente la température ambiante et la température à la sortie du pad (D. Beïda)	92
Figure 46: Graphe représente humidité extérieur et humidité à la sortie du pad (Béchar)	93
Figure 47: Graphe représente humidité extérieur et humidité à la sortie du pad (D. Beïda) ..	94
Figure 48: Graphe représente la consommation énergétique du compresseur à Béchar.....	95
Figure 49 : Graphe représente la consommation énergétique du compresseur à D. Beida.....	96
Figure 50: Graphe représente Qsc rejeté par le condenseur à Béchar.....	97
Figure 51: Graphe représente Qsc rejeté par le condenseur à D. Beida.....	97
Figure 52: Évolution de la température ambiante et de l'humidité relative à l'extérieur de la maison solaire les 2 et 3 juin 2025	100
Figure 53: Évolution temporelle de la température et de l'humidité relative selon mode 1 et 2.	102
Figure 54: Variation de la température de l'évaporateur (T_{evap}) en fonction du temps avec indication des phases de démarrage et des cycles ON/OFF du compresseur.....	104

Figure 55: Profil temporel de T_{evap} selon les phases ON/OFF du compresseur dans le système de climatisation	105
Figure 56: Évolution cyclique de la température de l'évaporateur avec et sans tampon adiabatique.	106
Figure 57: Consommation électrique du climatiseur avec et sans tampon adiabatique.....	107
Figure 58: Optimisation de la consommation énergétique dans la Maison Solaire UDES : comparaison des modes de fonctionnement.....	109

Liste des Tableaux

Tableau 1 : représente quelque type des fluides frigorigène [2]	20
Tableau 2: Comparaison entre les deux cycles	30
Tableau 3: Comparaison entre DEC et IEC	44
Tableau 4 : Comparaison entre les systèmes de climatisation	51
Tableau 5: Les avantages et les inconvénients du refroidissement actif	52
Tableau 6: Les avantages et les inconvénients du refroidissement passif	52
Tableau 7: Descriptions des différents types de thermocouple	75
Tableau 8: Caractéristiques techniques du data logger HYDRA 2700.....	76
Tableau 9: Consommation d'eau du tampon évaporatif selon les intervalles horaires	103

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par le réchauffement climatique et l'urbanisation croissante, la demande en systèmes de climatisation connaît une augmentation exponentielle, particulièrement dans les régions soumises à des conditions climatiques extrêmes. L'Algérie, avec ses zones arides et semi-arides où les températures estivales dépassent régulièrement les 45°C, fait face à des défis considérables en matière de confort thermique et d'efficacité énergétique. Cette situation soulève une problématique double : comment répondre aux besoins croissants de climatisation tout en limitant la consommation énergétique et l'impact environnemental associés ?

Les systèmes de climatisation conventionnels à cycle de compression simple, largement répandus dans le secteur résidentiel et tertiaire, présentent une efficacité fortement réduite lorsqu'ils opèrent dans des conditions de température extérieure élevée. Ce phénomène s'explique principalement par l'augmentation de la pression de condensation et la diminution du rendement volumétrique du compresseur, entraînant une surconsommation électrique significative et une réduction de la durée de vie des équipements. Face à cette problématique, l'optimisation des performances énergétiques des climatiseurs devient un enjeu technique, économique et environnemental majeur.

Parmi les solutions envisageables pour améliorer l'efficacité des systèmes de climatisation, le refroidissement adiabatique par évaporation (tampon de refroidissement) représente une approche prometteuse, particulièrement adaptée aux climats chauds et secs. Cette technique, inspirée de principes naturels d'évaporation, consiste à pré-refroidir l'air entrant dans le condenseur en le faisant passer à travers un média humidifié, permettant ainsi d'abaisser sa température sans apport énergétique significatif. L'intégration de ce procédé aux climatiseurs conventionnels pourrait constituer une solution hybride alliant simplicité, efficacité et faible impact environnemental.

Le présent travail de recherche vise à évaluer, de manière rigoureuse et quantitative, l'impact de l'intégration d'un système de refroidissement adiabatique par tampon de refroidissement sur les performances d'un climatiseur split à cycle de compression simple. L'originalité de cette étude réside dans l'analyse comparative des performances du système dans deux contextes climatiques algériens contrastés : Béchar, représentative d'un climat désertique sec, et Dar El Beïda, caractéristique d'un climat côtier humide. Cette approche permet d'identifier les conditions optimales d'application de cette technologie et d'en quantifier précisément les bénéfices selon les spécificités climatiques locales.

La méthodologie adoptée combine une approche expérimentale, menée au sein de l'Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES) de Bou Ismaïl, et une modélisation numérique détaillée réalisée avec le logiciel TRNSYS 2016. Cette double démarche permet non seulement de valider les modèles théoriques par des mesures empiriques, mais aussi d'explorer un large éventail de scénarios et de configurations difficilement réalisables en conditions réelles. Les paramètres étudiés incluent la température et l'humidité de l'air à l'entrée et à la sortie du tampon de refroidissement, la chaleur rejetée par le condenseur, ainsi que la consommation énergétique horaire du système.

Le travail est organisé en quatre chapitres principaux :

Chapitre I – Généralités sur la climatisation :

Le premier chapitre introduit les bases techniques du fonctionnement d'un climatiseur : cycle thermodynamique, composants (compresseur, condenseur, évaporateur, détendeur), types de systèmes (split, monobloc, réversible), et défis actuels liés à l'efficacité énergétique dans les environnements extrêmes.

Chapitre II – État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique :

Le deuxième chapitre expose le principe de l'évaporation adiabatique, ses différentes configurations (directe, indirecte), ses avantages et limites, ainsi que les résultats d'études antérieures. Ce chapitre établit le cadre théorique nécessaire à l'intégration du système adiabatique dans une unité de climatisation.

Chapitre III – Simulation et montage expérimental :

Le troisième chapitre détaille la simulation numérique du système dans TRNSYS, la configuration des composants, les types utilisés, les scénarios étudiés, ainsi que le montage expérimental mis en place à l'UDES. Il présente les équipements (climatiseur testé, tampon de refroidissement, data logger, thermocouples, pompe...etc) et la méthodologie de mesure.

Chapitre IV – Résultats et discussion :

Les résultats issus de la simulation et de l'expérimentation sont comparés, analysés et discutés selon les deux zones climatiques. Ce chapitre met en évidence les bénéfices du Tampon de refroidissement sur la performance du système, en particulier dans le climat sec de Béchar.

En conclusion générale, une synthèse des principaux résultats est présentée ainsi que des perspectives pour la poursuite de ce travail.

CHAPITRE I

Généralité sur la climatisation

I.1. Introduction à la climatisation :

La climatisation joue un rôle essentiel dans le confort thermique des espaces intérieurs, que ce soit pour les habitations, les bureaux, les industries ou les infrastructures sensibles comme les hôpitaux et les centres de données. Son importance ne cesse de croître avec l'urbanisation, l'industrialisation et l'augmentation des températures mondiales due au changement climatique.

L'histoire de la climatisation remonte à l'Antiquité, où les Romains utilisaient l'eau courante pour rafraîchir leurs villas. En Chine et en Perse, des tours à vent et des systèmes d'évaporation étaient employés pour abaisser la température intérieure des bâtiments.

Le premier système moderne de climatisation a été développé en 1902 par Willis Carrier, qui a mis au point un appareil permettant de réguler la température et l'humidité de l'air dans une imprimerie.

Depuis, les systèmes ont évolué vers des technologies plus efficaces, allant des climatiseurs à compression de vapeur aux systèmes à absorption et aux nouvelles solutions écologiques utilisant l'évaporation adiabatique.

I.2. L'histoire de la climatisation :[1]

Pour le rafraîchissement des boissons, les civilisations grecques et égyptiennes utilisaient l'effet d'évaporation de l'eau à travers les vases et les jarres poreux, C'est au 6ème siècle que sont apparues les premières machines frigorifiques à compression de fluide.

1834 : Jacob PERKINS, de Londres, construit la première machine de réfrigération à compression mécanique avec de l'éther comme réfrigérant ;

1859 : Le Français Ferdinand CARRE réalise la première installation industrielle (machine à absorption d'eau + NH_3 = Ammoniac !) ;

1930 : Grâce à l'étude théorique du chimiste belge Frédéric SWARTS, le grand essor de l'industrie du froid s'installe, avec la mise au point par une société américaine d'un nouveau fluide frigorigène « Le DICHLORODIFLUOROMETHANE » (R12).

1950 : Général Motors met en place des glaces teintées sur ses véhicules pour réduire la température intérieure engendrée par rayonnement. En France, le chauffage de l'habitacle des véhicules se généralise ;

1955 : Les premiers systèmes de conditionnement d'air font leur apparition sur des véhicules américains type Chevrolet. L'ensemble du système était pré

-assemblé par Frigidaire à l'usine de Dayton (Ohio) et mis en place sur environ 3500 véhicules durant la même année ;

1960 : Les concepteurs aboutissent à combiner le système de réfrigération à celui de chauffage ;

1970 : Les constructeurs européens adoptent la climatisation dans leurs véhicules ;

1980 : Apparition des premiers systèmes de climatisation automatisés sur les véhicules. Au milieu des années 90, près de 90% des véhicules américains sont climatisés, contre seulement 20% en Europe !

Actuellement, près de 80% des véhicules, toutes gammes confondues, sont équipés de série d'un système de climatisation ou d'air conditionné. Cette croissance ne peut que s'accroître dans les années futures, de par les qualités du bien-être apporté par le conditionnement de l'air de l'habitacle des véhicules automobiles. [1]

I.3. Les Fluides Frigorigènes :

Le **fluide frigorigène** est un élément essentiel du cycle thermodynamique d'un climatiseur, car il permet le transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un espace.

Il circule en boucle fermée à travers les différents composants du système : le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. Son rôle principal est d'absorber la chaleur de l'air intérieur en s'évaporant à basse pression dans l'évaporateur, puis de la rejeter à l'extérieur en se condensant à haute pression dans le condenseur.

Pour assurer ce processus, le fluide subit des changements d'état successifs (liquide-vapeur) en fonction de la pression et de la température appliquées.

Historiquement, les premiers fluides utilisés étaient les CFC (chlorofluorocarbones), mais leur impact destructeur sur la couche d'ozone a conduit à leur interdiction.

Aujourd'hui, les HFC (hydrofluorocarbures) et les fluides naturels comme le CO₂ ou l'ammoniac sont privilégiés pour réduire l'empreinte environnementale des systèmes de climatisation.

Le choix du fluide frigorigène dépend de plusieurs critères, notamment son efficacité énergétique, sa pression de fonctionnement et son impact écologique.

L'évolution des réglementations internationales pousse également à développer des alternatives plus respectueuses de l'environnement, telles que les fluides à faible potentiel de réchauffement global (PRG), garantissant un meilleur compromis entre performance et durabilité.

Tableau 1 : représente quelque type des fluides frigorigène [2]

CARACTÉRISTIQUES DE RÉFRIGÉRANTS NATURELS							
RÉFRIGÉRANT	GROUPE	CLASSE DE SÉCURITÉ	PDO ¹	PRG 100 ²	TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION ³	TEMPÉRATURE MINIMALE ⁴	PRESSIION CRITIQUE ⁵
R-718 (Eau)	L1	A1	0	0	100	373,9	217,7
R-729 (Air)	--	--	0	0	-194,5	--	--
R-717 (Ammoniaque)	L2	B2L	0	0	-33	132,4	114,2
R-744 (Dioxyde de carbone)	L1	A1	0	1	-78	31	73,8
R-170 (Éthane)	L3	A3	0	6	-89	32	49,7
R-600a (Isobutane)	L3	A3	0	3	-12	134,7	36,5
R-290 (Propane)	L3	A3	0	3	-42	96,7	42,5
R-1270 (Propylène)	L3	A3	0	2	-48	91	46,1

¹ PDO: Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone.
² PRG 100: Potencial de calentamiento atmosférico.
³ Température d'ébullition (°C) à la pression atmosphérique de 101,3 kPa.
⁴ Température du point critique (°C).
⁵ Pression du point critique (bar abs.)

I.3.1. Propriété du fluide frigorigène :

Les fluides frigorigènes se distinguent principalement par leur capacité à s'évaporer à basse température sous pression atmosphérique.

Ils sont essentiels dans les systèmes de production de froid. Bien que des gaz courants comme l'air ou l'azote puissent théoriquement être utilisés comme réfrigérants, leur application pratique est limitée.

En effet, un fluide frigorigène doit répondre à plusieurs critères :

-Il doit posséder une grande capacité d'absorption de chaleur lors de son passage de l'état liquide à l'état gazeux, un phénomène connu sous le nom de chaleur latente de vaporisation. Cette propriété est essentielle pour assurer l'efficacité des systèmes frigorifiques et de climatisation, où ces fluides sont utilisés sous forme pure ou en mélange.

-Il doit être respectueux de l'environnement, car toute fuite dans l'atmosphère peut avoir un impact écologique important.

-Il doit être inoffensif pour l'homme, afin de garantir la sécurité des utilisateurs.

-Il doit être adapté aux températures de fonctionnement des échangeurs thermiques du système frigorifique, notamment le condenseur et l'évaporateur.

Les fluides utilisés pour générer des températures très basses diffèrent de ceux employés en climatisation.

I.4. C'est quoi La climatisation :

La climatisation est la technique qui consiste à modifier, contrôler et réguler les conditions de l'air ambiant intérieur d'un local (température, humidité, niveau de poussières, etc.) : pour des raisons de confort dans des maisons individuelles, bureaux ou bien même à l'intérieur de l'automobile, pour des raisons techniques dans (des laboratoires médicaux, locaux de fabrication de composants électroniques, blocs opératoires, salles informatiques, etc.).

I.5. Le but de la climatisation :

Le but de la climatisation est la création d'une ambiance interne agréable pour l'être humain, quelles que soient les conditions externes.

D'un point de vue sanitaire, un climatiseur sert aussi de déshumidificateur et assainit ainsi l'ambiance. Dans un local à conditionner, il faut mettre en évidence certaines grandeurs de l'air intérieur telles que (sa température, son humidité, son agitation et sa pureté), et cela varie d'un local à un autre selon le domaine d'utilisation.

I.6. Les composant principal d'un climatiseur :

Un climatiseur fonctionne grâce à un cycle thermodynamique impliquant plusieurs composants essentiels.

Voici une description détaillée de chaque élément :

I.6.1. Compresseur :

Le compresseur est un élément clé du cycle de réfrigération d'un climatiseur, jouant un rôle essentiel dans la compression et la circulation du fluide frigorigène.

Il aspire le fluide à l'état gazeux à basse pression et basse température, puis le comprime pour augmenter sa pression et sa température avant de l'envoyer vers le condenseur.

Il existe plusieurs types de compresseurs utilisés dans les climatiseurs :

- **Compresseur à piston**, qui fonctionne par un mouvement alternatif et est souvent utilisé dans les petites unités ;

- **Compresseur scroll**, plus efficace et silencieux, couramment employé dans les systèmes résidentiels et commerciaux ;
- **Compresseur rotatif**, qui offre un bon compromis entre performance et coût,
- **Compresseur à vis**, conçu pour les applications industrielles nécessitant une grande capacité de refroidissement. Le choix du compresseur dépend des besoins en puissance, de l'efficacité énergétique et du type d'application du climatiseur. [3]



Figure 1: compresseur [3]

I.6.2. Condenseur :

Le condenseur est un composant essentiel du système de climatisation qui permet d'évacuer la chaleur absorbée par le fluide frigorigène.

Après avoir été comprimé, le fluide arrive sous forme de gaz à haute pression et haute température dans le condenseur, où il cède sa chaleur à l'air ambiant ou à un autre fluide caloporteur.

Ce processus provoque la condensation du fluide frigorigène, le transformant en liquide à haute pression avant qu'il ne passe dans le détendeur. Il existe plusieurs types de condenseurs :

- **Condenseur à air**, qui utilise un ventilateur pour dissiper la chaleur et est couramment employé dans les climatiseurs domestiques ;
- **Condenseur à eau**, qui fonctionne avec un circuit de refroidissement par eau et est plus efficace pour les applications industrielles ;
- **Condenseur évaporatif**, qui combine l'air et l'eau pour améliorer l'échange thermique et réduire la consommation énergétique. Le choix du condenseur dépend des conditions climatiques et des exigences en termes de rendement énergétique. [4]



Figure 2: Condenseur [4]

I.6.3. Détendeur :

Le détendeur est un composant clé du cycle frigorifique d'un climatiseur, jouant un rôle dans la régulation du fluide frigorigène. Après sa condensation, le fluide arrive dans le détendeur sous forme liquide à haute pression et haute température.

Le détendeur provoque une chute de pression du fluide, ce qui entraîne une diminution de sa température avant qu'il n'entre dans l'évaporateur.

Ce processus est essentiel pour permettre au fluide de capter efficacement la chaleur de l'air ambiant et de refroidir l'espace à climatiser.

Il existe plusieurs types de détendeurs :

- **Détendeur thermostatique**, qui ajuste automatiquement le débit en fonction de la température de l'évaporateur,
- **Détendeur capillaire**, qui est un simple tube utilisé dans les petits climatiseurs pour un coût réduit,
- **Détendeur électronique**, plus précis et efficace, souvent employé dans les systèmes modernes pour optimiser la performance énergétique.

Le choix du détendeur influence directement le rendement et la stabilité du système de climatisation.[5]

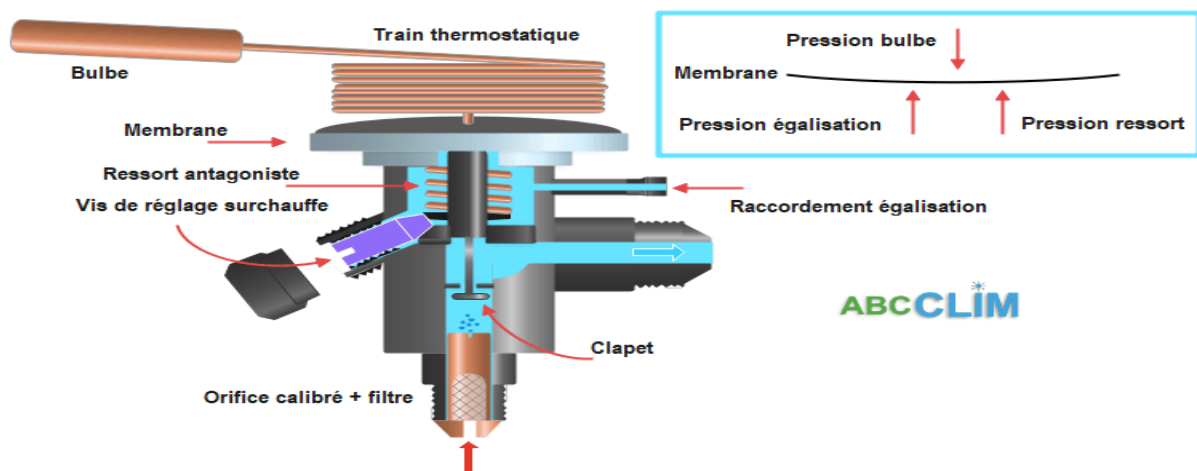


Figure 3: Détendeur [5]

I.6.4. L'évaporateur :

L'évaporateur est un composant essentiel du cycle frigorifique d'un climatiseur, où se produit l'absorption de chaleur permettant de rafraîchir l'air ambiant.

Il reçoit le fluide frigorigène à basse pression et basse température en provenance du détendeur.

À l'intérieur de l'évaporateur, le fluide s'évapore en absorbant la chaleur de l'air soufflé par le ventilateur, ce qui entraîne une baisse de température de l'air qui est ensuite diffusé dans l'espace à climatiser.

Ce processus permet de créer une sensation de fraîcheur tout en maintenant un confort thermique optimal.

Il existe différents types d'évaporateurs :

- **Évaporateurs à air**, couramment utilisés dans les climatiseurs résidentiels et commerciaux, où l'échange thermique se fait avec l'air ambiant,
- **Évaporateurs à eau**, utilisés dans les systèmes industriels où l'échange thermique s'effectue avec un fluide caloporteur.

L'efficacité de l'évaporateur dépend de sa conception, du débit d'air ou d'eau et de l'optimisation du transfert de chaleur. [6]



Figure 4: L'évaporateur [6]

I.7. Principe du fonctionnement d'un climatiseur :

Le climatiseur fonctionne selon le principe de la thermodynamique en utilisant un cycle de réfrigération pour extraire la chaleur d'un espace intérieur et la rejeter à l'extérieur.

Ce processus commence lorsque l'air chaud de la pièce est aspiré vers l'évaporateur, où un fluide frigorigène à basse pression absorbe la chaleur et s'évapore en gaz.

Ce gaz est ensuite comprimé par le compresseur, ce qui augmente sa pression et sa température.

Le gaz chaud passe ensuite dans le condenseur, où il libère sa chaleur à l'extérieur et se condense en liquide.

Ce liquide est ensuite détendu par un détendeur, ce qui abaisse sa pression et sa température avant qu'il ne retourne à l'évaporateur pour recommencer le cycle.

En plus de refroidir l'air, le climatiseur élimine également l'humidité en condensant la vapeur d'eau présente dans l'air, contribuant ainsi à un meilleur confort et à une qualité de l'air améliorée.

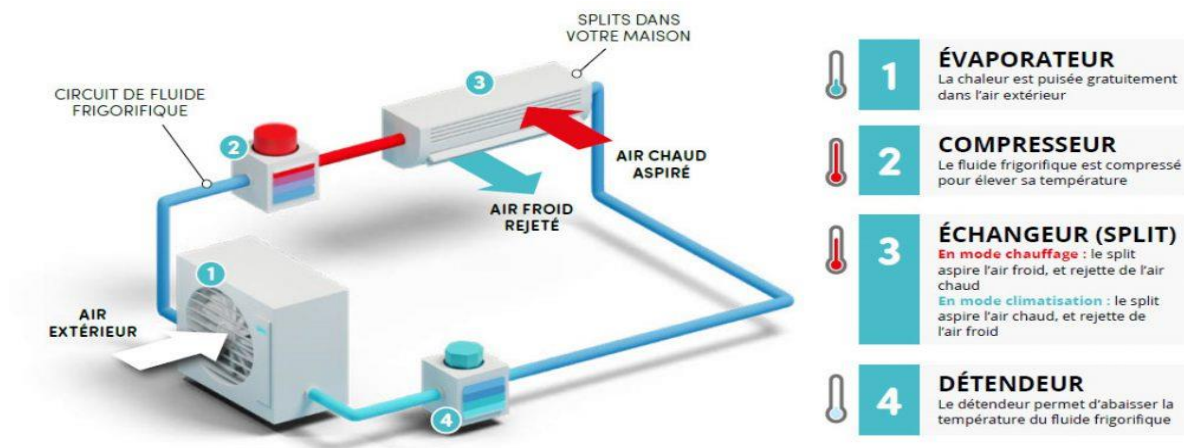


Figure 5: Principe du fonctionnement d'un climatiseur [7]

I.8. Cycle thermodynamique pour un climatiseur [8] :

La climatisation repose sur des principes thermodynamiques fondamentaux permettant de transférer la chaleur d'un espace intérieur vers l'extérieur afin de maintenir une température confortable.

Ce transfert de chaleur est réalisé à l'aide d'un cycle frigorifique, qui utilise les propriétés physiques des fluides frigorigènes pour absorber, transporter et rejeter l'énergie thermique.

L'analyse thermodynamique d'un climatiseur permet de mieux comprendre son fonctionnement, d'évaluer ses performances et d'identifier les améliorations possibles pour optimiser son efficacité énergétique.

Le cycle de compression de vapeur, largement utilisé dans les systèmes de climatisation modernes, suit une succession de transformations thermodynamiques régies par les lois de la thermodynamique.

Dans cette partie, nous explorerons les principes fondamentaux qui régissent la climatisation, en détaillant le cycle thermodynamique, les performances énergétiques, les propriétés des fluides frigorigènes et les technologies permettant d'améliorer l'efficacité des systèmes de climatisation.

Une meilleure compréhension de ces aspects est essentielle pour développer des solutions plus durables et adaptées aux défis climatiques et énergétiques actuels.

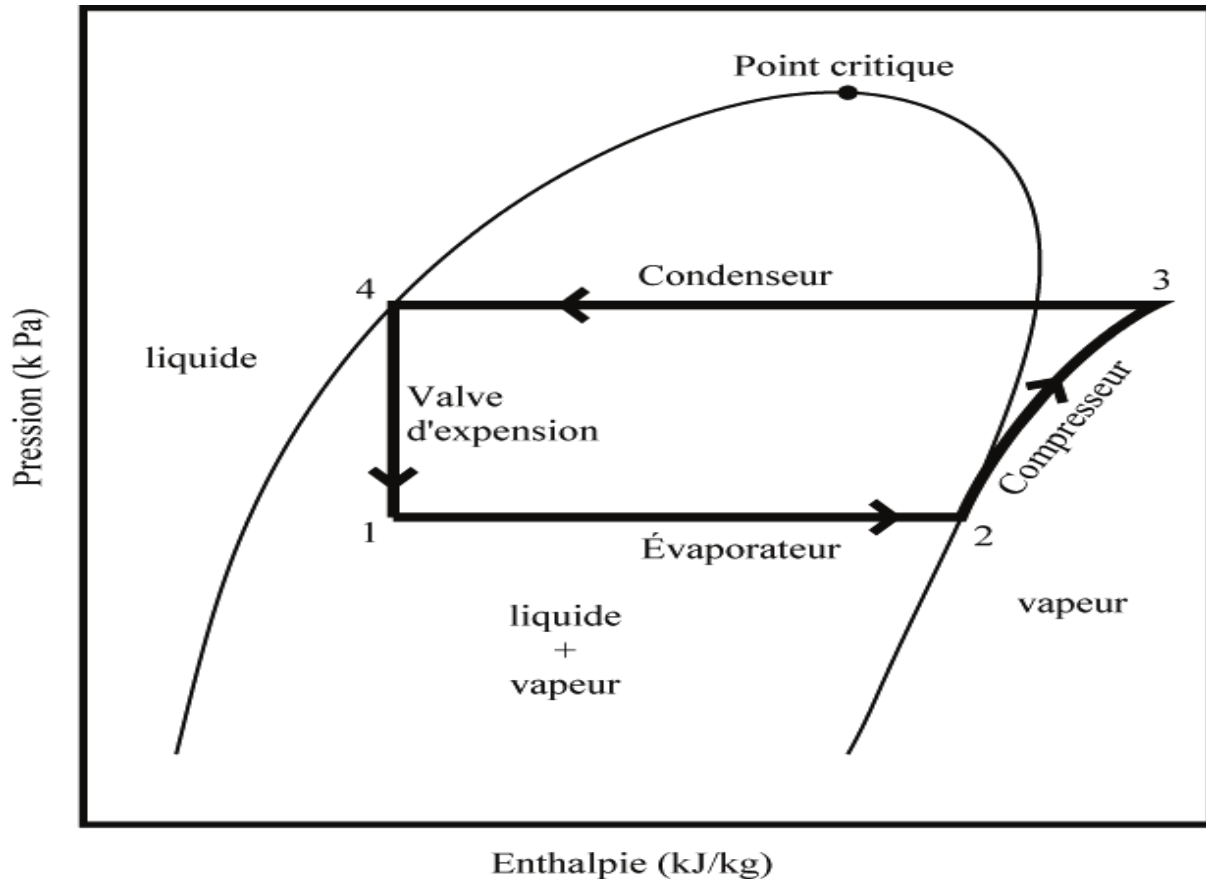


Figure 6: Diagramme P-H représente cycle climatiseur [8]

I.8.1. Les paramètres physiques clés d'un climatiseur :

- **Température :**

Le chaud et le froid sont appréciés par des sensations d'où une évaluation irrationnelle de ces grandeurs. Aussi, il a été défini la température qui permet une objectivité des mesures.

La température caractérise le niveau auquel la chaleur se trouve dans un corps permettant ainsi de dire qu'un corps est plus ou moins chaud qu'un autre.

Les températures sont exprimées en (degrés Celsius) mais dans la littérature, on rencontre les degrés Fahrenheit (F) et les degrés Kelvin (K)

$$1 \text{ kcal} = 4,185 \text{ kJ} = -1 \text{ Fg (frigorie)}$$

$$1 \text{ thermie (Th)} = 1000 \text{ kcal} = 4,185 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ BTU} = 1,053 \text{ kJ (BTO : British Thermal unit)}$$

- **Puissance :**

La puissance est le rapport de l'énergie fournie ou absorbée sur l'unité de temps. L'unité légale est le Watt (W).

Conversion d'unités :

$$1 \text{ kW} = 860 \text{ kCal/h}$$

$$1 \text{ kCal/h} = -1 \text{ Fg/h} = 1,163 \text{ W}$$

$$1 \text{ cv (cheval)} = 736 \text{ W}$$

- **Pression :**

L'unité légale de la pression est le Pascal (Pa) qui est égal à la pression uniforme exercée par une force de 1 N (Newton) sur une surface de 1 m².

L'unité de pression couramment utilisée par les frigoristes est le Bar et il faut distinguer : Les appareils de mesure des pressions (appelés manomètres) sur les systèmes frigorifiques qui sont gradués généralement en pression relative (par rapport à la pression atmosphérique) les appareils de mesures du vide (appelés vacuomètres) sur les systèmes frigorifiques qui sont gradués en pression absolue (par rapport au vide absolu).

- Conversion d'unités

$$1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1.02 \text{ kg/m}^2 = 0.986 \text{ atm} = 750 \text{ mmHg}$$

$$1 \text{ Bar} = 14,54 \text{ PSI} = 10.2 \text{ mce (mètre de colonnes d'eau)}$$

PSI : Pound per Square Inch (Livre par Pouce carré)

- **Changement d'état :**

La maîtrise des deux états de la matière que sont la phase liquide et la phase vapeur est primordiale en froid.

Le changement d'état se définit comme la phase de transformation d'une phase vers une autre phase.

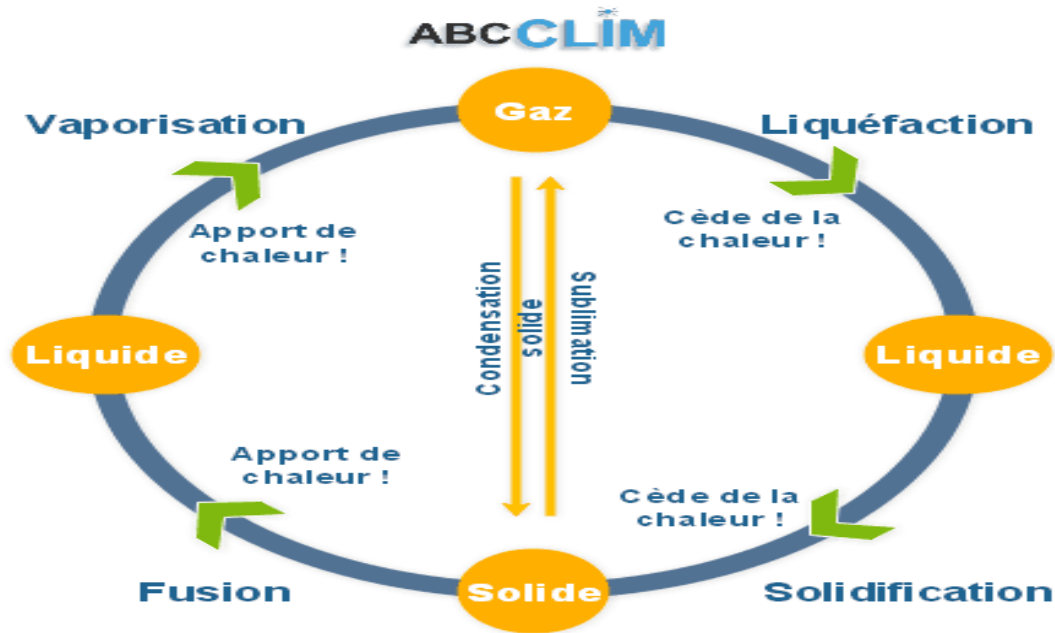


Figure 7: Changements d'états de la matière [9]

I.8.2. Cycle Carnot :

Le cycle de Carnot est composé de deux isothermes et de deux adiabatiques.

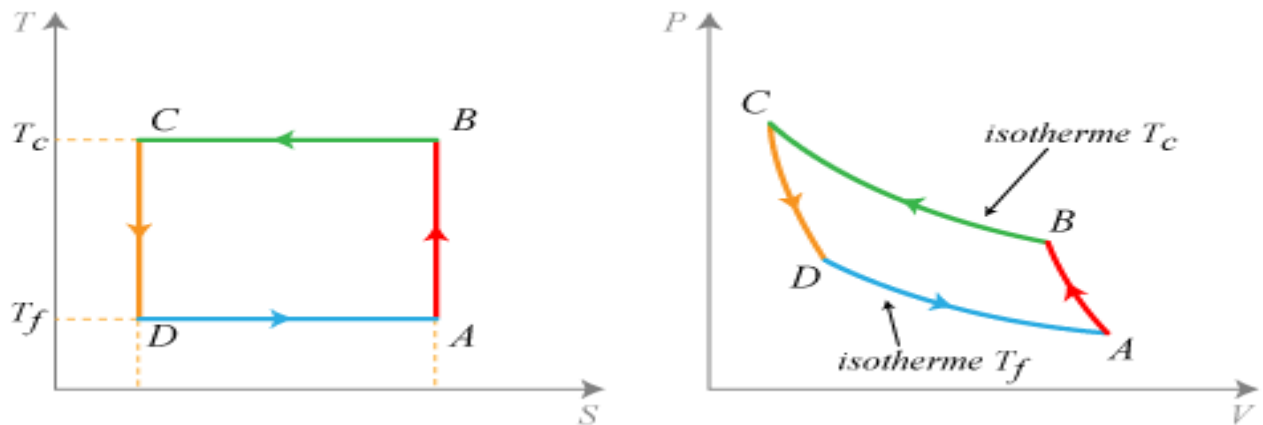


Figure 8: Diagrammes T-S et P-V Cycle Carnot [10]

Le système reçoit le travail W , prend la chaleur Q_f à la source froide et cède la quantité de chaleur Q_c à la source chaude.

I.8.3. Comparaison entre cycle Carnot et un cycle climatiseur :

Le tableau présenté compare le cycle de Carnot et le cycle d'un climatiseur selon plusieurs critères essentiels. Le cycle de Carnot est un modèle idéal et réversible, utilisé principalement pour transformer la chaleur en travail dans les moteurs thermiques, tandis que le cycle de climatiseur est un système réel, comportant des pertes irréversibles, dont le but est de transférer la chaleur d'une source froide vers une source chaude. Concernant le flux de chaleur, le cycle de Carnot absorbe la chaleur à haute température et la rejette à basse température, alors que le climatiseur fonctionne à l'inverse, en absorbant la chaleur à basse température (intérieur) et en la rejetant à haute température (extérieur).

Tableau 2: Comparaison entre les deux cycles

Critère	Cycle de Carnot	Cycle de Climatiseur
Nature	Idéal et réversible	Réel avec pertes irréversibles
But	Transformer la chaleur en travail (moteur thermique)	Transférer la chaleur d'une source froide à une source chaude
Flux de chaleur	Absorption à haute température, rejet à basse température	Absorption à basse température (intérieur), rejet à haute température (extérieur)
Efficacité	$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$	$COP = \frac{T_C}{T_H - T_C}$
Processus	Compression/détente isentropiques et échanges isothermes	Compression/détente non idéales, condensation et évaporation

I.8.4. Les caractéristiques du cycle climatiseur :

- **Types des fluides frigorigènes :**

- Exemples courants : R-410A, R-32, R-134a, R-290 (propane).
- Doit avoir de bonnes propriétés thermodynamiques et un faible impact environnemental.

- **Coefficient de performance (COP) :**

Où Q_{froid} est la chaleur extraite et W l'énergie consommée par le compresseur.

$$COP_f = \frac{\text{Froid produit a la source froide}}{\text{energie apportée au système}} \dots\dots\dots (1)$$

- **Le rendement énergétique :**

- Le **SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio)** mesure l'efficacité saisonnière du climatiseur en refroidissement.

- Plus le SEER est élevé, plus l'appareil est performant.

I.9. Les différents types de climatiseur :

Un climatiseur est un appareil de climatisation servant à maintenir l'air d'une salle, d'une pièce ou d'une enceinte fermée dans des conditions de température et d'humidité requises.

De ce fait, il est fortement conseillé de connaître les types de climatiseurs et les caractéristiques de chaque type :

I.9.1. Climatiseur monobloc :

Le climatiseur monobloc, tout en étant mobile, regroupe toutes les fonctions d'un climatiseur classique dans un seul corps.

Économique, il produit du froid tout en évacuant de la chaleur. Il ne possède pas d'unité d'extérieur, mais il dispose d'un tuyau d'évacuation pour l'air chaud à faire passer par la fenêtre.

L'installation du climatiseur monobloc ne nécessite pas de grands travaux. Le climatiseur monobloc convient essentiellement à un usage ponctuel dans les régions où les périodes de chaleur ne durent pas longtemps.

Un nettoyage du filtre suffit pour l'entretien du climatiseur monobloc. Pensez tout de même à remplacer régulièrement les filtres.

- Le dépoussiérage du ventilateur améliore le fonctionnement de l'appareil.
- Vous pouvez également opter pour un climatiseur monobloc autonettoyant.



Figure 9: Climatiseur monobloc

I.9.2. Climatiseur réversible :

La climatisation réversible est obtenue avec un climatiseur réversible c'est à dire qui fonctionne en pompe à chaleur.

Par inversion du cycle frigorifique, le climatiseur devient une pompe à chaleur et peut ainsi aussi bien rafraîchir que chauffer.

Aujourd'hui le coût climatiseur ou climatiseur réversible est très proche de sorte que qu'une "clim peut chauffer" également.

Attention néanmoins car le système de chauffage avec un système de climatiseur réversible à air par exemple ne donnera pas le même confort thermique que des radiateurs par exemple.

Autant nous sommes habitués à être rafraîchi par de l'air frais et le sentir en termes de courants d'air est peu dérangent, voire apprécié.

Autant le soufflage d'air chaud qui se refroidit assez vite par ailleurs peut donner des sensations d'inconfort thermique.

De plus, la ventilation en continu peut être également inconfortable sur le plan acoustique. [11]

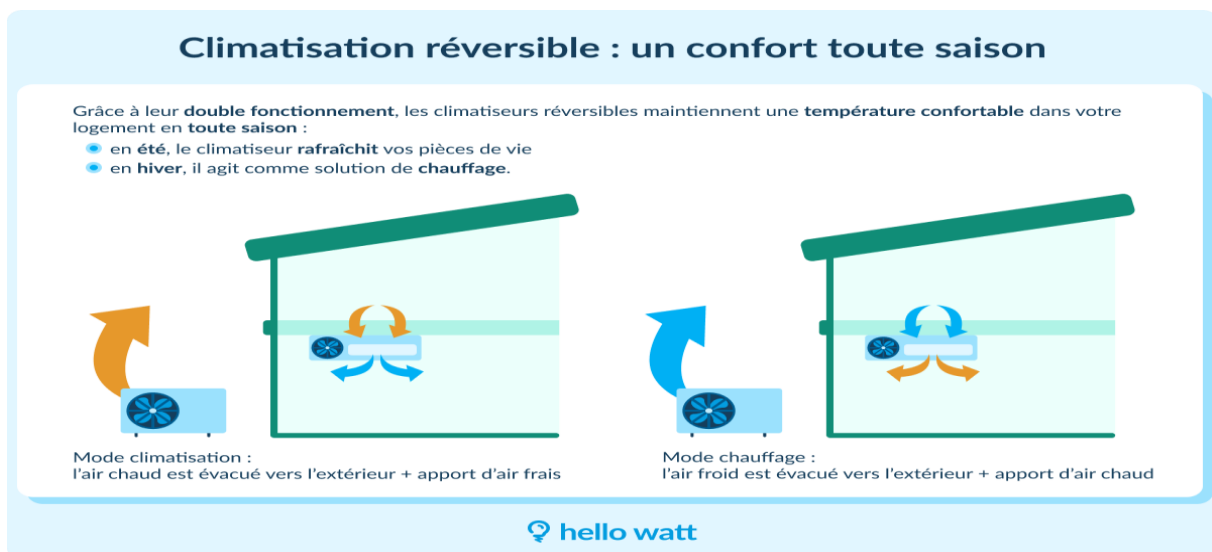


Figure 10: Climatiseur réversible [11]

I.9.3. Climatiseur central :

La climatisation centrale est une installation de climatisation permettant de climatiser la totalité d'un bâtiment.

Les besoins du bâtiment sont alors traités dans leur ensemble, l'installation visant à homogénéiser la température et la qualité de l'air du bâtiment tout en réduisant la consommation énergétique de l'ensemble. [12]



Figure 11: Climatiseur central [12]

I.9.4. Climatiseur split :

Climatiseur split-system ou split système : C'est un climatiseur coupé en deux, avec une partie extérieure dite condenseur et compresseur, et une unité intérieure assurant le rafraîchissement. Entre les deux unités intérieure et extérieure, une liaison frigorifique servant à transporter les calories de l'unité intérieure à l'unité extérieure.

Les deux unités et les tuyauteries sont pré remplies de fluide frigorigène. Les parties sont hermétiquement fermées par des raccords spéciaux dit à opercules. Les climatiseurs split-system peuvent être mono-split (une seule unité intérieure) ou multi-split (plusieurs unités intérieures) pour une seule unité extérieure.

Le climatiseur split-system est dit climatiseur invertir lorsqu'ils sont réversibles et qu'ils disposent d'une régulation performante de type invertir. [13]

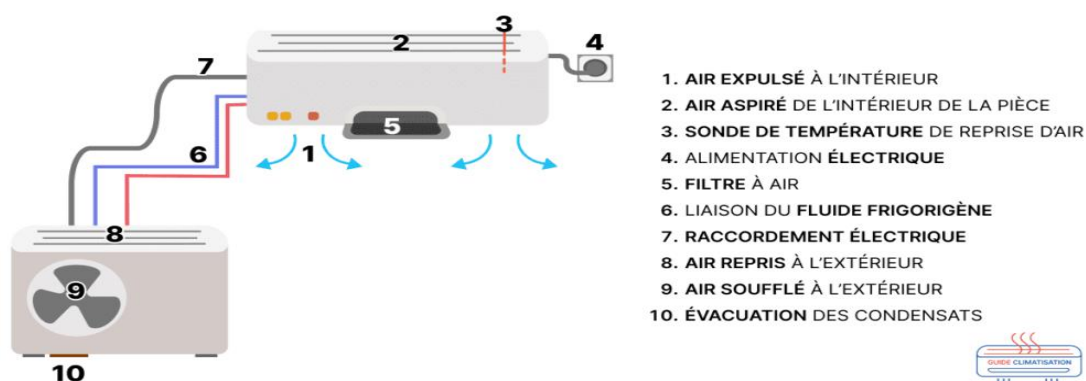


Figure 12: Schéma pour un climatiseur split [13]

I.10. Les avantages de la climatisation split :

Avec un climatiseur mural, l'encombrement est minimal, et l'installation est plutôt rapide. Toutes les unités sont reliées entre elles par des tuyaux installés dans le mur.

Ces derniers servent à acheminer le fluide utilisé pour faire fonctionner le climatiseur. Pour installer un climatiseur gainable, de lourds travaux sont parfois nécessaires.

En effet, toutes les maisons n'ont pas la hauteur de plafond requise, ou alors un faux plafond déjà installé.

Ce dispositif est conseillé pour des habitations en cours de construction, ou qui vont faire l'objet de travaux de réhabilitation.

Le climatiseur mobile est utile car il permet d'être déplacé, mais il montre rapidement ses limites quand il faut climatiser de grands espaces. Il vaut mieux opter pour ce type d'appareil en solution d'appoint. Dans beaucoup de cas, les climatiseurs mobiles ne sont pas réversibles. On ne peut les utiliser que pour rafraîchir mais pas pour se réchauffer en période d'hiver.

I.11. Les inconvénients de la climatisation split :

Afin de profiter pleinement de la puissance d'une climatisation split, les ouvertures d'un logement doivent toujours être closes.

En effet, l'appareil aura du mal à maintenir une température constante dans une pièce où l'air extérieur entre. Pour cette raison, l'entretien du climatiseur est très important. Il faudra prendre garde à dépoussiérer toutes les deux semaines le dispositif, vider régulièrement les bacs à condensats et nettoyer les filtres. Cela peut être un inconvénient pour certaines personnes qui ne disposent pas de beaucoup de temps.

I.12. Importance de la climatisation dans les environnements extrêmes :

La climatisation joue un rôle essentiel dans les environnements extrêmes, notamment dans les régions où les températures dépassent les 50°C ou dans les milieux soumis à des conditions climatiques rigoureuses. Son importance se manifeste dans plusieurs domaines clés :

- **Protection de la santé et du bien-être**

Dans les environnements à chaleur extrême, la climatisation est cruciale pour prévenir les coups de chaleur, la déshydratation et d'autres problèmes de santé liés à une exposition

prolongée aux hautes températures. Elle est particulièrement vitale pour les populations vulnérables (enfants, personnes âgées, travailleurs en extérieur) vivant dans des climats désertiques ou tropicaux.

- **Amélioration des conditions de travail et de productivité**

Dans les secteurs industriels et tertiaires situés dans des régions arides, la climatisation permet de maintenir des températures de travail supportables, améliorant ainsi la productivité des employés.

Dans les usines, les bureaux, les hôpitaux et les centres de données, elle est indispensable pour éviter les interruptions liées à la surchauffe des équipements et à l'inconfort thermique des travailleurs.

- **Préservation des équipements et infrastructures**

Les machines industrielles, équipements électroniques et systèmes informatiques sont sensibles aux températures élevées.

Dans les data center, laboratoires de recherche et installations militaires, la climatisation empêche la surchauffe des composants électroniques, garantissant ainsi leur bon fonctionnement et prolongeant leur durée de vie.

- **Contribution à la sécurité alimentaire et médicale**

Dans les zones à climat extrême, la conservation des aliments et des médicaments dépend fortement de la climatisation et des chaînes du froid.

Les produits pharmaceutiques, comme les vaccins et les médicaments thermosensibles, nécessitent un stockage à température contrôlée pour éviter leur dégradation.

- **Adaptation aux défis du changement climatique**

Avec la hausse des températures due au réchauffement climatique, la demande en climatisation augmente, notamment dans les régions déjà touchées par des vagues de chaleur extrême.

L'optimisation des systèmes de refroidissement, notamment par des solutions plus écologiques et moins énergivores comme le refroidissement adiabatique, devient un enjeu majeur pour réduire la consommation d'énergie et l'impact environnemental.

I.13. Défis énergétiques et environnementaux [14] :

L'essor de la climatisation dans le monde, notamment dans les régions à climat extrême, soulève plusieurs défis énergétiques et environnementaux.

Avec l'augmentation des températures et l'urbanisation croissante, la demande en climatisation continue de croître, entraînant des impacts significatifs sur la consommation d'énergie et l'environnement.

Parmi ces défis :

- **Consommation énergétique élevée :**

Les climatiseurs classiques fonctionnent principalement sur des cycles de compression de vapeur, qui nécessitent une quantité importante d'électricité. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), la climatisation représente environ 10 % de la consommation mondiale d'électricité, et ce chiffre pourrait tripler d'ici 2050 si aucune mesure d'efficacité énergétique n'est adoptée. Dans les régions arides et très chaudes, la demande en climatisation atteint des pics qui exercent une pression considérable sur les réseaux électriques, pouvant provoquer des coupures de courant et une surcharge des infrastructures énergétiques.

- **Impact des fluides frigorigènes sur le climat :**

Les climatiseurs utilisent des fluides frigorigènes, qui sont souvent des hydrofluorocarbures (HFC) ou d'autres substances ayant un fort potentiel de réchauffement global (PRG). Ces gaz sont responsables d'un effet de serre beaucoup plus puissant que le CO₂. Bien que de nouvelles générations de fluides plus écologiques (comme le R32, le CO₂ ou l'ammoniac) soient développées, leur utilisation reste limitée par des contraintes techniques et économiques.

- **Effet d'îlot de chaleur urbain :**

Dans les grandes villes, l'usage intensif de la climatisation contribue à l'effet d'îlot de chaleur urbain. En rejetant la chaleur absorbée dans l'environnement extérieur, les climatiseurs augmentent la température ambiante, ce qui entraîne une demande encore plus forte en refroidissement.

Ce cercle vicieux aggrave les conditions climatiques locales et augmente la consommation énergétique globale.

- **Consommation d'eau pour les systèmes adiabatiques :**

Les systèmes de climatisation par évaporation adiabatique, bien qu'énergétiquement plus efficaces que la climatisation traditionnelle, nécessitent une quantité importante d'eau pour fonctionner.

Dans les régions désertiques où l'eau est déjà une ressource rare, cela pose un problème d'approvisionnement et de durabilité. L'optimisation de la gestion de l'eau dans ces systèmes est donc un enjeu clé pour leur développement.

I.14. Adaptation des technologies de climatisation aux climats arides :

Les climats arides, caractérisés par des températures extrêmes supérieures à 50°C et une faible humidité, posent des défis uniques pour le refroidissement des espaces.

La forte demande en climatisation dans ces régions entraîne une consommation énergétique élevée et une pression sur les ressources en eau. Pour répondre à ces enjeux, plusieurs technologies innovantes et adaptées ont été développées.

- **Climatisation par évaporation adiabatique :**

Le refroidissement adiabatique repose sur l'évaporation de l'eau pour diminuer la température de l'air. Cette technologie est particulièrement efficace dans les climats arides en raison de la faible humidité ambiante.

Avantages :

- Réduction de la consommation énergétique jusqu'à 80 % par rapport aux climatiseurs conventionnels.
- Système simple et facile à entretenir.

Limites :

- Fort besoin en eau, posant un problème dans les régions où cette ressource est rare.
- Moins efficace lorsque l'humidité relative est élevée.

Solution :

- Amélioration des médias évaporatifs et hybridation avec d'autres technologies pour optimiser le rendement.

- **Refroidissement adiabatique indirect (RAI) :**

Contrairement à l'évaporation adiabatique directe, cette technique rafraîchit l'air entrant sans ajouter d'humidité, grâce à un échangeur de chaleur.

Avantages :

- Plus adapté aux applications nécessitant un air sec (hôpitaux, laboratoires, Datacenter).
- Réduction de la consommation d'eau tout en conservant une bonne efficacité thermique.

- **Climatisation solaire thermique et photovoltaïque :**

Les climats arides offrent un fort potentiel pour l'utilisation de l'énergie solaire afin d'alimenter les systèmes de refroidissement.

Avantages :

- Diminution de la dépendance au réseau électrique.
- Compatibilité avec des systèmes de refroidissement par absorption.

Limites :

- Coûts initiaux élevés.
- Besoin de stockage thermique ou électrique pour un fonctionnement optimal.

I.15. Conclusion :

La climatisation est une technologie essentielle qui repose sur des principes thermodynamiques et des systèmes sophistiqués permettant d'assurer le confort thermique dans divers environnements.

À travers ce chapitre, nous avons exploré son fonctionnement, ses composants clés et ses différentes typologies, mettant en lumière son rôle central dans les secteurs résidentiel, commercial et industriel.

Cependant, face aux défis énergétiques et environnementaux actuels, il devient impératif d'optimiser les performances des climatiseurs en réduisant leur consommation énergétique et leur impact environnemental. L'évolution des fluides frigorigènes, l'amélioration des composants et l'intégration de nouvelles technologies sont autant de pistes à explorer pour rendre ces systèmes plus efficaces et durables.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons plus particulièrement au refroidissement par évaporation adiabatique, une alternative prometteuse pour améliorer l'efficacité des climatiseurs, notamment dans les environnements à températures extrêmes.

Cette approche, inspirée des phénomènes naturels d'évaporation, pourrait représenter une solution innovante pour répondre aux besoins croissants de climatisation tout en minimisant les impacts écologiques.

CHAPITRE II

État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

II.1. Introduction :

Face aux défis énergétiques et environnementaux posés par la climatisation traditionnelle, des solutions alternatives plus durables et économes en énergie ont émergé. Parmi elles, la climatisation par évaporation adiabatique se distingue comme une technologie efficace, particulièrement adaptée aux climats chauds et arides. Ce procédé repose sur un principe naturel : l'absorption de chaleur par l'évaporation de l'eau, permettant ainsi de rafraîchir l'air sans recourir à un cycle frigorifique complexe et énergivore.

L'évaporation adiabatique offre de nombreux avantages, notamment une consommation énergétique réduite, l'utilisation d'un fluide naturel (l'eau) et une empreinte environnementale moindre.

Cependant, son efficacité dépend fortement des conditions climatiques et des configurations du système. Il est donc essentiel d'analyser en détail son fonctionnement, ses différentes technologies (refroidissement direct et indirect) ainsi que ses performances en fonction des environnements d'application.

Dans ce chapitre, nous explorerons d'abord les principes thermodynamiques de l'évaporation adiabatique, avant d'étudier les différents types de systèmes existants et leurs domaines d'application. Une attention particulière sera portée aux avantages et aux limitations de cette technologie, afin de mieux comprendre son potentiel dans l'optimisation de l'efficacité des climatiseurs dans des zones où les températures dépassent les 50°C.

II.2. État de l'art sur refroidissement par évaporation adiabatique :

Cette partie présente des expériences parler de : les différents types de refroidissement par évaporation adiabatique :

II.2.1. Refroidissement adiabatique direct :

Le refroidissement adiabatique direct (DEC – Direct Evaporative Cooling) est la forme la plus simple et la plus répandue du refroidissement par évaporation. Il consiste à mettre l'air à rafraîchir en contact direct avec de l'eau ou un média humidifié, généralement un tampon en cellulose ou en matériau synthétique. Lorsque l'air chaud et sec traverse ce média constamment humidifié par une pompe de circulation, l'eau s'évapore en absorbant la chaleur latente nécessaire à son changement d'état (environ 2454 kJ/kg à 20 °C) [15], ce qui abaisse la température de l'air tout en augmentant son humidité relative. L'air ainsi refroidi et humidifié

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

est ensuite introduit directement dans l'espace à climatiser, repoussant l'air chaud vers l'extérieur. Ce procédé, qui ne nécessite ni compresseur ni fluide frigorigène, offre plusieurs avantages : simplicité de conception, facilité d'installation, faible coût d'investissement et de fonctionnement, très faible consommation d'énergie (jusqu'à 80 % d'économie) et respect de l'environnement grâce à l'absence de gaz à effet de serre [16]. Cependant, il présente aussi des limites : l'augmentation de l'humidité de l'air traité peut devenir inconfortable dans les climats déjà humides, et l'efficacité du système diminue fortement lorsque l'humidité relative extérieure est élevée, limitant ainsi le potentiel de refroidissement (généralement de 6 à 13 °C selon les conditions) [17]. L'efficacité du DEC dépend de plusieurs paramètres, notamment l'épaisseur et la nature du média (une plus grande épaisseur améliore l'efficacité mais augmente les pertes de charge et la consommation d'eau), la vitesse de l'air (optimale entre 1,5 et 2,5 m/s), la qualité de l'eau utilisée et l'entretien du pad. Par exemple, **L'étude de Sohani et al. (2017)** [18] analyse les performances des panneaux de refroidissement en cellulose, en soulignant l'impact de l'épaisseur du panneau, de la vitesse de l'air et de l'humidité relative sur l'efficacité thermique et la perte de pression. Leurs travaux ont montré qu'une augmentation de l'épaisseur du panneau de 50 mm à 100 mm améliore l'efficacité de refroidissement de 21 %, mais entraîne une augmentation des pertes de charge de 15 %. De plus, une vitesse d'air optimisée entre 1,5 et 2,5 m/s permet d'atteindre une meilleure performance thermique, et l'efficacité diminue de 12 % lorsque l'humidité relative passe de 30 % à 50 %. (Voir figure 13)

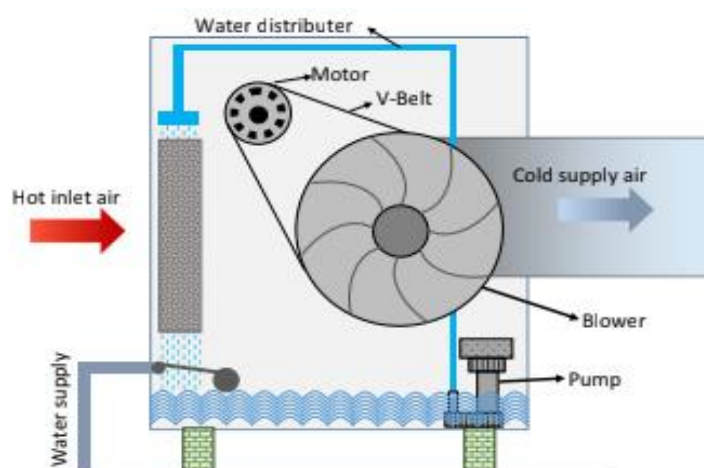


Figure 13: schéma représente refroidissement par EAD [18]

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

II.2.2. Refroidissement adiabatique indirect :

Le refroidissement à évaporation adiabatique indirect (IEC – Indirect Evaporative Cooling) est une technologie de pointe qui permet de rafraîchir l'air sans recourir à des fluides frigorigènes ni compresseurs, en exploitant uniquement le principe naturel de l'évaporation de l'eau, mais sans augmenter l'humidité de l'air soufflé dans les espaces à climatiser. Contrairement au refroidissement adiabatique direct (DEC), où l'air neuf est humidifié, l'IEC repose sur un échangeur de chaleur à canaux séparés : l'air extérieur chaud passe dans des canaux secs, tandis qu'un flux d'air secondaire (souvent l'air extrait du bâtiment) est humidifié dans des canaux adjacents. L'évaporation de l'eau dans ce flux secondaire absorbe la chaleur, qui est ensuite transférée à l'air principal via l'échangeur, abaissant sa température sans en augmenter l'humidité.

Ce procédé est particulièrement adapté aux applications industrielles, tertiaires et résidentielles nécessitant un air sec et tempéré, et il s'intègre facilement dans les centrales de traitement d'air modernes ou en rénovation. Selon Rampazzo et al. (2019) [19], qui ont modélisé ces systèmes avec précision, l'IEC peut, dans des conditions optimales, abaisser la température de l'air pulsé de 30 °C à 17 °C, avec une efficacité qui dépend fortement de la température et de l'humidité relative de l'air extérieur, du débit d'air et d'eau, et de la configuration de l'échangeur (par exemple, l'utilisation de pulvérisateurs d'eau à pression améliore sensiblement l'échange thermique).

Lorsque l'humidité relative extérieure augmente, l'efficacité de l'IEC diminue, mais elle reste supérieure à celle du DEC dans les environnements où le contrôle de l'humidité est essentiel. Les innovations récentes portent sur l'optimisation des stratégies de contrôle, l'emploi de matériaux avancés pour les surfaces d'échange, et le développement de systèmes hybrides combinant IEC et climatisation traditionnelle pour maximiser l'efficacité énergétique et la flexibilité d'exploitation. (Voir figure 14)

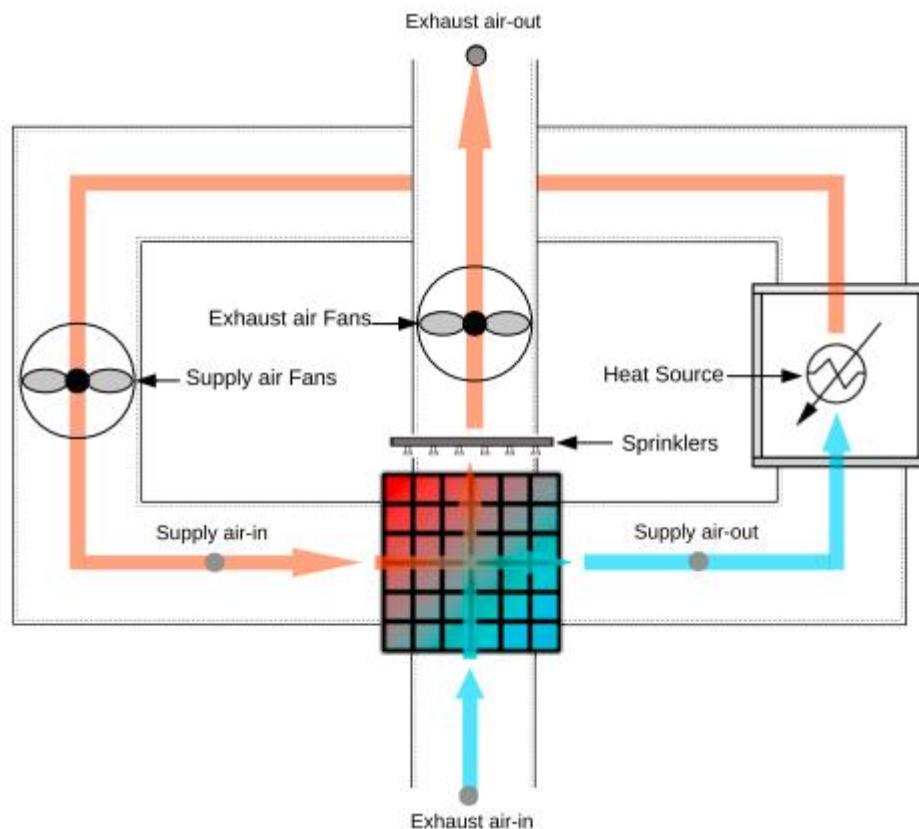


Figure 14 : Schème représente refroidissement par évaporation adiabatique direct [19]

II.2.3. Comparaison Structurée des Systèmes de Refroidissement Adiabatique Direct (DEC) et Indirect (IEC) :

L'analyse comparative entre le refroidissement adiabatique direct (DEC) et le refroidissement adiabatique indirect (IEC) met en évidence les avantages spécifiques de chaque technologie en fonction des besoins et des contraintes climatiques. Le DEC permet d'abaisser la température de l'air jusqu'à 10 à 15 °C en dessous de la température ambiante, mais il augmente l'humidité relative de l'air, ce qui limite son application aux climats secs et arides. Sa consommation d'énergie est très faible, et son efficacité thermique varie de 60 à 90 % selon les conditions [20]. À l'inverse, l'IEC assure un refroidissement efficace (jusqu'à 5 à 10 °C en dessous de la température ambiante) sans augmenter l'humidité de l'air soufflé, ce qui en fait une solution idéale pour les environnements où le contrôle de l'humidité est crucial, notamment dans les climats chauds à humidité variable. Bien que sa consommation d'énergie soit légèrement supérieure à celle du DEC, l'IEC offre une efficacité thermique de 50 à 80 %. Ainsi, le choix entre DEC et IEC doit être guidé par les conditions climatiques locales et les exigences

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

de confort, en particulier en ce qui concerne la gestion de l'humidité de l'air intérieur. (Voir Tableau 3)

Tableaux 3 : Comparaison entre le refroidissement adiabatique direct (DEC) et indirect (IEC) [20]

Critère	Refroidissement Direct (DEC)	Refroidissement Indirect (IEC)
Température de sortie de l'air	Jusqu'à 10-15°C en dessous de la température ambiante	Jusqu'à 5-10°C en dessous de la température ambiante
Impact sur l'humidité de l'air	Augmente l'humidité relative	Aucune augmentation de l'humidité
Consommation d'énergie	Très faible	Faible mais légèrement supérieure au DEC
Efficacité thermique	60-90% selon les conditions	50-80%
Utilisation recommandée	Climats secs et arides	Climats chauds avec taux d'humidité variable

II.2.4. Conditionnement d'air hybride solaire avec pré-refroidissement par évaporation :

L'intégration de l'énergie solaire dans les systèmes de climatisation constitue une avancée majeure pour répondre aux enjeux de la transition énergétique, notamment dans les régions soumises à des vagues de chaleur et à une forte demande en refroidissement. L'approche hybride, qui combine le pré-refroidissement adiabatique de l'air au condenseur avec l'alimentation électrique par panneaux photovoltaïques, permet de maximiser l'efficacité énergétique tout en réduisant significativement l'empreinte carbone du bâtiment. Dans ce contexte, l'étude expérimentale menée par **P. Martínez et al** [21] analyse le comportement d'un climatiseur hybride solaire doté d'un système de pré-refroidissement à évaporation de l'air entrant dans le condenseur, sous climat méditerranéen estival. (Voir figure 15)

Les résultats obtenus démontrent l'intérêt de cette solution : l'utilisation d'un panneau évaporatif de 100 mm d'épaisseur assure une efficacité évaporative moyenne de 67,4 %, permettant de réduire la température d'entrée de l'air du condenseur de 6 °C en moyenne. Cette baisse de température se traduit par une diminution de 23 % de la puissance crête requise par le climatiseur, ainsi qu'une réduction remarquable de 43 % de la consommation énergétique quotidienne. L'efficacité énergétique (EER) du système est ainsi améliorée de 18,3 % lorsque le pré-refroidissement est activé. Par ailleurs, la contribution de l'énergie solaire à la couverture

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

des besoins électriques du climatiseur passe de 25 % (sans pré-refroidissement) à 30 % (avec pré-refroidissement), ce qui renforce l'autonomie énergétique du système et sa durabilité environnementale.

L'étude met également en avant plusieurs axes de développement pour optimiser encore ces performances : l'amélioration des matériaux et de la conception des panneaux évaporatifs pour accroître la capacité de refroidissement, l'intégration de systèmes de stockage d'énergie (batteries ou stockage thermique) afin d'augmenter l'autonomie et la flexibilité d'utilisation, ainsi que le recours à des fluides frigorigènes à faible potentiel de réchauffement global (GWP) pour limiter l'impact environnemental global du système. Enfin, la gestion intelligente de la production et de la consommation d'énergie, via des algorithmes de contrôle avancés, apparaît comme une piste prometteuse pour maximiser l'efficacité globale de ces systèmes hybrides.

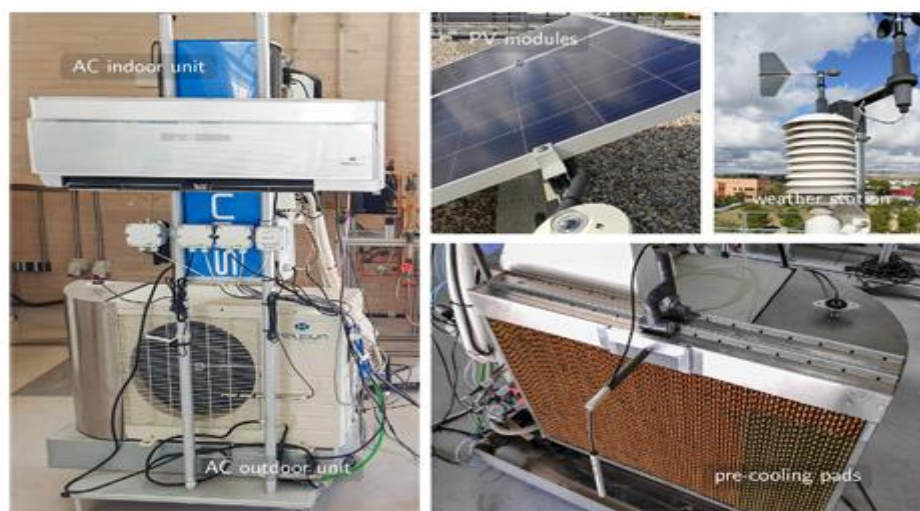


Figure 15 : Prototype de refroidissement adiabatique avec énergie solaire [21]

II.2.5. Étude comparative des performances de refroidissement des systèmes adiabatiques utilisant de l'eau de mer et de l'eau douce :

L'étude expérimentale menée par M.A. Abdelrahman et M.A. Sherif [22] s'intéresse à la comparaison des performances thermiques de deux systèmes de refroidissement adiabatique indirect, l'un alimenté en eau douce et l'autre en eau de mer, dans le but d'évaluer la faisabilité de l'utilisation de l'eau de mer dans les régions côtières chaudes et sèches où l'eau douce est limitée. Les auteurs ont réalisé une série de tests en laboratoire sur un système adiabatique indirect à contre-courant, en mesurant la température d'entrée et de sortie de l'air, l'efficacité évaporative du système et l'impact du type d'eau sur la performance globale. Les résultats

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

montrent que le système utilisant l'eau douce atteint une efficacité évaporative de 77 %, contre 72 % pour l'eau de mer, avec une réduction de la température de l'air en sortie pouvant aller jusqu'à 12 °C selon les conditions climatiques. Toutefois, l'utilisation de l'eau de mer entraîne la formation de dépôts de sels, nécessitant des précautions techniques telles que l'emploi de matériaux résistants à la corrosion ou la mise en place de systèmes de rinçage périodique. Cette recherche met en évidence que la performance du refroidissement adiabatique dépend fortement de la qualité de l'eau, un facteur déterminant dans les zones arides ou côtières, et souligne l'importance de choisir des matériaux et des stratégies d'entretien adaptés. Bien que notre étude ne porte pas directement sur l'eau de mer, ces résultats confirment que les conditions environnementales (humidité, température, disponibilité et qualité de l'eau) influencent directement l'efficacité du refroidissement adiabatique, justifiant ainsi l'intégration de pads spécifiques et le choix de sites contrastés comme Béchar (climat sec) et Dar El Beïda (climat humide).

II.2.6. Analyse aérodynamique et simulation CFD de plusieurs pads cellulaires pour le refroidissement évaporatif :

L'étude numérique approfondie réalisée par **S.A. Fayazbakhsh et al** [23] s'appuie sur la simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) afin d'analyser et d'optimiser plusieurs modèles de pads cellulaires en cellulose utilisés dans les systèmes de refroidissement adiabatique (Voir figure 16). L'objectif principal de cette recherche est de déterminer quelles géométries de pads offrent le meilleur compromis entre efficacité de refroidissement, perte de charge aéraulique et humidification de l'air, permettant ainsi d'orienter les choix technologiques vers des solutions à la fois performantes et économes en énergie. Pour ce faire, les auteurs ont testé différentes configurations de pads, notamment des structures à angles croisés (par exemple, 45°/15° et 30°/30°), en évaluant la distribution de la température de l'air à travers le média, la perte de pression induite par chaque géométrie et l'humidité relative de l'air en sortie. Les résultats montrent que les pads à géométrie croisée asymétrique (45°/15°) se distinguent par une efficacité thermique supérieure à 80 %, permettant d'obtenir des baisses de température pouvant atteindre 13 °C dans des conditions climatiques chaudes et sèches, ce qui est particulièrement intéressant pour les régions arides. Par ailleurs, il ressort que les pads présentant une grande surface de contact air-eau maximisent la performance de refroidissement et l'humidification, bien qu'ils engendrent une résistance accrue à l'écoulement de l'air, ce qui

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

peut augmenter la consommation énergétique des ventilateurs. Cette étude met ainsi en lumière l'importance du compromis entre efficacité thermique et pertes de charge, soulignant la nécessité d'une conception optimisée des pads pour garantir à la fois un refroidissement performant, une consommation d'énergie maîtrisée et une durabilité accrue des équipements dans les systèmes de refroidissement adiabatique modernes.

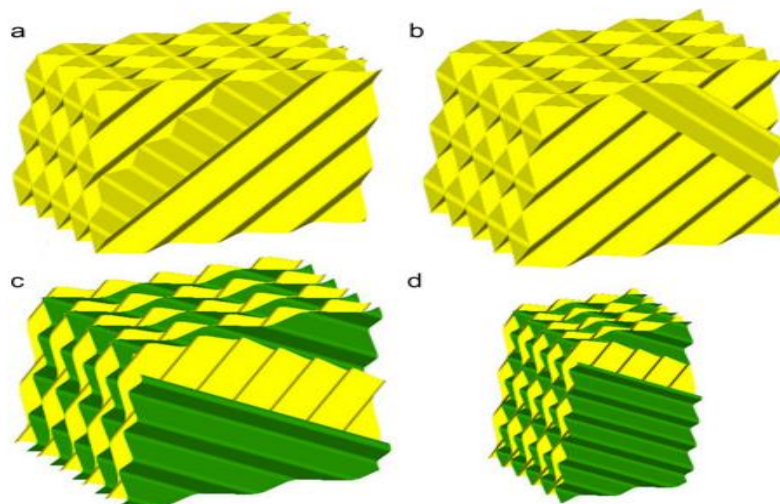


Figure 16 : Composition des quatre pads évaporatifs réalisés par G&R [23]

Cette étude est très pertinente dans le cadre de notre mémoire, qui implique l'intégration de pads pour améliorer le rendement du condenseur. Les simulations CFD confirment que le choix de la géométrie du pad influence fortement la performance du système. Ces résultats appuient notre démarche de modélisation dans TRNSYS visant à optimiser la température d'entrée au condenseur en utilisant un tampon de refroidissement, surtout en climat aride où les gains sont maximaux.

II.3. Principe de l'évaporation adiabatique :

II.3.1. Définition et principes physiques :

L'adiabatique se réfère à un processus thermodynamique qui se déroule sans échange de chaleur avec l'environnement. Cela signifie que la température d'un système adiabatique varie sans ajout ni retrait de chaleur.

La chaleur est transférée d'un mode sensible (la température) à un mode latent (la vapeur d'eau). C'est la chaleur naturellement présente dans l'air qui permet l'évaporation de l'eau,

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

entraînant ainsi des coûts de fonctionnement très faibles. Voici comment ce principe est appliqué dans un rafraîchisseur d'air

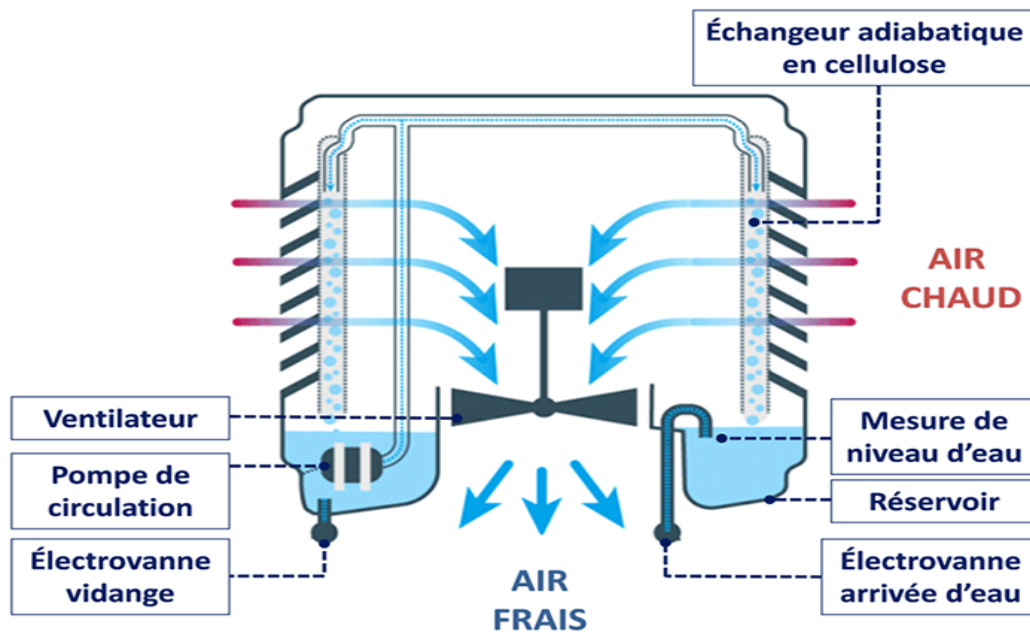


Figure 14: Schéma représente refroidissement par évaporation adiabatique [24]

Le principe est le suivant : si de l'air chaud et sec traverse un filet d'eau, il en provoque l'évaporation. La chaleur nécessaire à la vaporisation d'eau étant extraite de l'air. Celui-ci se refroidit.

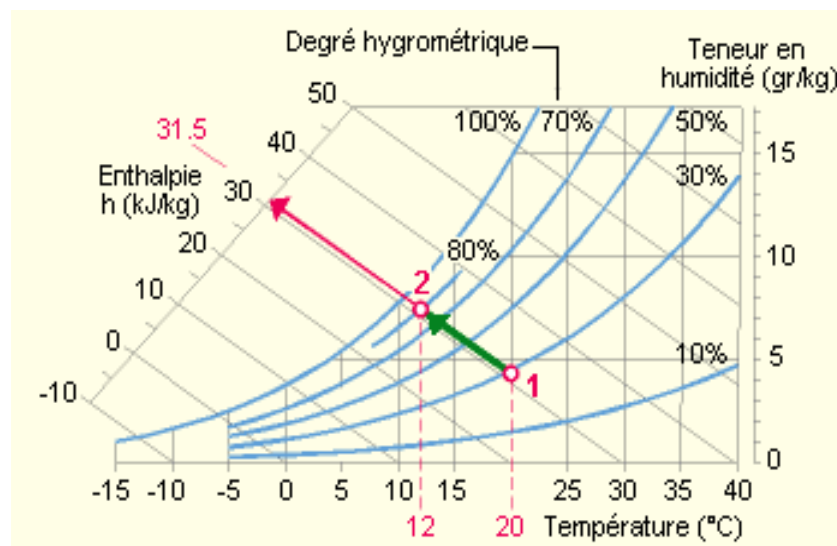


Figure 15: Diagramme psychrométrique [25]

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

II.3.2. Principes physiques :

L'équation adiabatique est dérivée à partir des lois de la thermodynamique et des propriétés spécifiques des gaz idéaux. Voici comment elle est obtenue :

- **Premier principe de la thermodynamique appliqué au système adiabatique**

Le premier principe de la thermodynamique s'écrit : $U=Q-W$ avec, U l'énergie interne du système thermodynamique, Q la chaleur échangée entre le système et son environnement et W le travail mécanique effectué par le système sur son environnement ou vice versa.

Dans le cas d'un processus adiabatique, il n'y a pas de transfert de chaleur ($Q=0$) : $U= -W$

- **Gaz idéal et système adiabatique**

Le travail W effectué par un gaz idéal lors de son expansion ou compression est donné par :

$$w = \int P \times dV \dots \dots \dots (2)$$

En utilisant l'équation d'état du gaz idéal

$$(PV=nRT) \dots \dots \dots (3)$$

Cela permet de substituer P par

$$P = \frac{n \times R \times T}{V} \dots \dots \dots (4)$$

En outre, la variation de l'énergie interne peut s'écrire :

$$U = n \times C_v \times T \dots \dots \dots (5)$$

Avec n est le nombre de moles, R la constante universelle des gaz parfaits, C_v est la capacité thermique molaire à volume constant, et T est la variation de température.

- **Combinaison des équations**

En combinant toutes ces équations, nous obtenons :

$$-P \times dv = -\frac{nRT}{V} \times dv \dots \dots \dots (6)$$

En simplifiant :

$$C_v \times \frac{dT}{T} = -R \frac{dV}{V} \dots \dots \dots (7)$$

Intégrons les deux côtés de cette équation

$$\int \frac{dT}{T} = -\frac{R}{C_v} \times \frac{dV}{V} \dots \dots \dots (8)$$

Chapitre II : État de l'art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d'intégration énergétique

Les intégrales donnent :

$$\ln T + \frac{R}{C_v} \times \ln V = \text{constante} \dots\dots\dots (9)$$

En utilisant la relation $\frac{C_p}{C_v} \dots\dots\dots (10)$

Et $R = C_p - C_v \dots\dots\dots (11)$

on peut exprimer $\frac{R}{C_v} = \gamma - 1 \dots\dots\dots (12)$

Nous obtenons $T \times V^{\gamma-1} = \text{constante} \dots\dots\dots (13)$

• Équation de la transformation adiabatique

En utilisant l'équation d'état du gaz idéal et en substituant pour T, nous obtenons l'équation fondamentale d'un système adiabatique : $PV = \text{constante}$

Où : P et V sont respectivement la pression et le volume du gaz, est le rapport des capacités thermiques, également appelé indice adiabatique.

L'équation adiabatique décrit donc la relation entre pression, volume, et température dans un processus adiabatique.

II.4. L'importance du système adiabatique dans le refroidissement [26]:

Le système adiabatique est crucial pour théoriser et améliorer les processus industriels. Il contribue à approfondir notre compréhension des principes fondamentaux de la thermodynamique et de la physique.

Son utilisation est diversifiée : des centrales électriques aux moteurs automobiles, en passant par la mécanique quantique et l'astrophysique.

Par ailleurs, le système adiabatique est largement utilisé dans le secteur du refroidissement et de la climatisation des locaux. Le rafraîchissement par évaporation d'eau représente une méthode efficace pour rafraîchir un bâtiment.

Ce procédé de refroidissement utilise des échangeurs spécifiques où l'eau s'évapore pour absorber la chaleur de l'air ambiant, provoquant ainsi une baisse de température sans nécessité l'utilisation de compresseurs énergivores ou de fluide réfrigérant.

II.5. Comparaison avec les systèmes de climatisation classique :

Dans un climat extrême comme celui des zones arides de plus de 50°C, le refroidissement adiabatique présente l'avantage d'une faible consommation énergétique. Toutefois, son efficacité diminue lorsque l'humidité de l'air augmente, nécessitant des solutions d'optimisation. (Voir Tableau 4)

Tableau 4 : Comparaison entre les systèmes de climatisation

Critères	Refroidissement adiabatique	Climatisation conventionnelle (compression de vapeur)
Principe de fonctionnement	Évaporation de l'eau	Cycle frigorifique avec fluide frigorigène
Consommation énergétique	Faible	Élevée (compresseur et condenseur énergivores)
Impact environnemental	Aucun fluide frigorigène	Utilisation de gaz réfrigérants potentiellement polluants
Performance en climat sec	Très efficace	Performant mais avec une consommation élevée
Performance en climat humide	Réduction d'efficacité	Efficace, mais avec un déshumidificateur supplémentaire
Coût d'installation	Bas à moyen	Élevé

II.6. Technologies et configurations des systèmes à évaporation adiabatique :

II.6.1. Différent méthode refroidissement par évaporation :

- **Refroidissement actif :**

Le refroidissement actif repose sur l'utilisation de dispositifs mécaniques ou électriques pour améliorer le transfert de chaleur. Il inclut des solutions comme les ventilateurs, les compresseurs, les pompes à chaleur et les systèmes de réfrigération à cycle de compression ou à absorption.

Ces méthodes permettent un refroidissement efficace même dans des environnements à température élevée, mais elles consomment de l'énergie et nécessitent un entretien régulier.

Chapitre II : État de l’art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d’intégration énergétique

Tableau 5 : Les avantages et les inconvénients du refroidissement actif

Avantages	Inconvénients
Permet un contrôle précis de la température	Consommation énergétique élevée
Efficacité élevée dans des conditions extrêmes	Impact environnemental (fluide frigorigène, gaz à effet de serre)
Adapté aux applications industrielles et résidentielles	Nécessite un entretien régulier
Compatible avec des énergies renouvelables (solaire, absorption)	Coût initial parfois élevé

- **Refroidissement passif :**

Le refroidissement passif utilise des principes naturels comme la conduction, la convection et le rayonnement thermique sans recourir à des dispositifs mécaniques. Il englobe des techniques telles que les échangeurs de chaleur passifs, la ventilation naturelle, le refroidissement évaporatif, les matériaux à changement de phase (PCM) et l'utilisation d'éléments architecturaux comme les murs trombes ou les toits réfléchissants.

Bien que cette méthode soit plus éco énergétique et durable, son efficacité dépend fortement des conditions environnementales et du dimensionnement du système. Ainsi, dans des contextes où la consommation d'énergie est une préoccupation majeure, une combinaison des deux approches peut être adoptée pour optimiser la performance thermique tout en réduisant les coûts énergétiques.

Tableau 6 : Les avantages et les inconvénients du refroidissement passif

Avantages	Inconvénients
Ne consomme pas d'énergie	Moins efficace dans les climats très humides
Solution écologique et durable	Nécessite une conception adaptée du bâtiment
Réduction des coûts d'exploitation	Dépend fortement des conditions climatiques
Améliore le confort thermique intérieur	Peut nécessiter des ajustements pour être efficace à grande échelle

II.6.2. Matériaux et médias utilisés pour l'évaporation :

- **Panneaux humidification :**

Les panneaux d'humidification ou paquets humidifiant (série PUC) sont réalisés avec des feuilles ondulées en cellulose, traitées bactérien statiques imprégnées avec des résines adaptées qui, en plus de leur donner une excellente consistance, rendent le panneau autoportant, empêchent la formation de moisissures et augmentent leur vie utile. Ils sont utilisés dans les applications où l'efficacité d'humidification et de refroidissement de l'air maximum est demandée, pour contenir les pertes de charge [27].



Figure 16: Panneau humidification [27]

- **Pulvérisation d'eau :**

La technique de refroidissement par pulvérisation d'eau repose sur l'évaporation de fines gouttelettes d'eau dans l'air ambiant pour réduire la température. Lorsqu'on pulvérise de l'eau sous forme de microgouttelettes, celles-ci absorbent la chaleur de l'air environnant pour s'évaporer, ce qui provoque un refroidissement adiabatique.

Cette méthode est particulièrement efficace dans les environnements chauds et secs, où l'air peut absorber davantage d'humidité. Elle est utilisée dans divers domaines, notamment le refroidissement des espaces extérieurs, des tours de refroidissement industrielles et même pour améliorer l'efficacité des climatiseurs en abaissant la température de l'air entrant. Toutefois, son efficacité dépend du taux d'humidité relative : plus l'air est sec, plus le refroidissement est significatif.[28]



Figure 17: Mini refroidisseur [28]

- **Performances des matériaux :**

Les performances des matériaux dédiés à l'évaporation adiabatique sont déterminées par plusieurs facteurs, notamment leur capacité d'absorption, leur porosité et leur aptitude à favoriser l'échange thermique avec l'air. Parmi les matériaux couramment utilisés, on distingue:

- **Les fibres cellulosiques :** Ces matériaux naturels présentent une excellente capacité capillaire et une bonne efficacité d'évaporation, favorisant un refroidissement efficace. Cependant, ils sont sensibles à la dégradation biologique et nécessitent un entretien fréquent.
- **Les médias synthétiques (polypropylène, polyester, plastiques poreux, etc.) :** Offrant une bonne résistance à l'humidité et aux moisissures, ces matériaux affichent une durée de vie plus longue que les fibres cellulosiques, bien que leur efficacité d'évaporation soit légèrement inférieure.
- **Les céramiques poreuses :** Ces matériaux possèdent une excellente résistance thermique et chimique, garantissant une durabilité optimale, mais leur coût de fabrication reste élevé.

L'efficacité du refroidissement dépend également de la structure physique du matériau, notamment son épaisseur, sa surface d'échange et sa perméabilité à l'air.

II.7. Objectifs de l’étude

L’objectif principal de cette étude est d’évaluer les performances thermiques et électriques d’un système de climatisation de type split intégrant un pré-refroidissement évaporatif au niveau du condenseur, à l’aide d’un tampon de refroidissement, dans des conditions estivales chaudes caractéristiques d’un climat méditerranéen.

Pour cela, la démarche s’articule autour de plusieurs axes :

- Réaliser une modélisation numérique avec le logiciel TRNSYS 2016 afin d’optimiser l’efficacité d’un climatiseur à compression dans des régions où les températures dépassent 45 °C, grâce à l’intégration d’un système de refroidissement par évaporation adiabatique.
- Étudier deux sites climatiques contrastés : Dar El Beïda (zone côtière humide) et Béchar (zone saharienne sèche), pour comparer l’influence des conditions environnementales sur les performances du système.
- Analyser plusieurs paramètres clés : la température de l’air à l’entrée du condenseur, l’humidité relative, la consommation énergétique du compresseur, la chaleur rejetée et les gains d’efficacité.
- Concevoir et tester expérimentalement un système de refroidissement adiabatique sur un climatiseur split installé dans une maison solaire basse consommation à l’UDES.
- Évaluer les résultats issus de la simulation et de l’expérimentation afin de valider la méthodologie adoptée, et de démontrer l’intérêt du refroidissement adiabatique en tant que solution écologique et économique, particulièrement adaptée aux environnements extrêmes.

II.8. Conclusion :

Le refroidissement par évaporation adiabatique représente une alternative prometteuse aux systèmes de climatisation traditionnels, en offrant une solution plus économe en énergie et respectueuse de l’environnement.

À travers ce chapitre, nous avons exploré les principes thermodynamiques de cette technologie, ses différentes configurations (refroidissement direct et indirect), ainsi que les avancées scientifiques et techniques qui améliorent ses performances.

L’analyse des études récentes a mis en évidence l’importance des paramètres influençant l’efficacité des systèmes adiabatiques, notamment la température et l’humidité de l’air, la conception des panneaux évaporatifs et les conditions de fonctionnement. De plus, l’intégration des énergies renouvelables, telles que l’énergie solaire et la géothermie, permet d’optimiser

Chapitre II : État de l’art des systèmes de refroidissement adiabatique et stratégies d’intégration énergétique

encore davantage ces systèmes, réduisant ainsi leur impact environnemental et leur consommation énergétique.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, le refroidissement adiabatique présente certaines limitations, notamment en ce qui concerne son efficacité réduite dans les climats humides et sa consommation d’eau. L’amélioration des matériaux, l’optimisation des stratégies de gestion de l’eau et le développement de systèmes hybrides combinant évaporation et réfrigération mécanique constituent des pistes de recherche essentielles pour surmonter ces défis.

Ainsi, le refroidissement adiabatique se positionne comme une solution viable pour répondre aux besoins croissants de climatisation, notamment dans les zones à fortes températures. Son potentiel d’innovation en fait un domaine clé pour le développement des bâtiments intelligents et des systèmes énergétiques durables, ouvrant la voie à des applications plus performantes et adaptées aux enjeux climatiques actuels.

Chapitre III

Simulation et expérimentation

III.1. Introduction

Après avoir exposé les principes théoriques de la climatisation et étudié les potentialités du refroidissement par évaporation adiabatique, le chapitre 3 est dédié à la simulation du système de climatisation hybride ainsi qu'à la réalisation d'une expérimentation en conditions réelles. Ce chapitre débute par la présentation de la méthodologie de simulation, détaillant les différentes étapes de modélisation réalisées avec le logiciel TRNSYS. Il poursuit ensuite avec la description de la mise en place de l'expérimentation pratique, en précisant les équipements et instruments utilisés pour valider les résultats obtenus.

III.2. Partie simulation

La simulation numérique constitue un outil indispensable pour analyser le comportement thermique et énergétique du système sans recourir à une multiplication de tests physiques coûteux et chronophages. Pour ce faire, le logiciel **TRNSYS** (Transient System Simulation Tool) a été retenu afin de modéliser le système complet, incluant le climatiseur, le média adiabatique, les conditions climatiques ainsi que les paramètres de fonctionnement.

III.2.1. Logiciel de simulation (TRNSYS)

TRNSYS est un logiciel de simulation dynamique spécialement conçu pour étudier le comportement thermique et énergétique des systèmes transitoires. Développé à l'origine en 1975 par le Solar Energy Laboratory de l'Université du Wisconsin (Klein et al., 1976) [29], il repose sur une architecture modulaire qui facilite la modélisation de systèmes complexes tels que les bâtiments, les installations de chauffage et de refroidissement, les dispositifs solaires, ou encore les réseaux énergétiques.

Chaque composant du système - climatiseur, échangeur, ventilateur, capteur, etc. - est représenté par une entité appelée « Type », une unité indépendante et interconnectable dans un schéma global. Cette modularité confère à TRNSYS une grande flexibilité, ce qui en fait un outil largement adopté dans la recherche et l'ingénierie énergétique pour simuler des solutions innovantes en matière de performance énergétique, d'efficacité thermique et d'intégration des énergies renouvelables.

Son interface conviviale, associée à des modules complémentaires tels que **TRNBuild** pour la modélisation des bâtiments, font de TRNSYS un logiciel incontournable pour les projets de simulation thermique à l'échelle du bâtiment ou du système.

III.2.2. Bilan Thermique :

Afin d'évaluer les performances énergétiques du système étudié, il est essentiel d'établir un bilan thermique global. Ce bilan permet de quantifier les échanges d'énergie entre les différents composants du climatiseur split, notamment le compresseur, l'évaporateur et le condenseur. L'analyse se concentre également sur l'impact du pré-refroidissement de l'air à l'aide du système de refroidissement adiabatique. En identifiant les flux thermiques entrants et sortants, le bilan thermique met en évidence les gains réalisés en termes de consommation électrique, d'efficacité énergétique et de réduction de la charge thermique.

- **Calcul de la chaleur rejetée par le condenseur et de la consommation électrique dans TRNSYS [30,31,32] :**

La chaleur rejetée par le condenseur correspond à l'énergie thermique extraite du fluide frigorigène lors de sa condensation, transférée à l'air ambiant. Cette chaleur doit être évacuée pour assurer le fonctionnement du cycle frigorifique. La consommation électrique représente l'énergie absorbée par le compresseur et les auxiliaires pour produire le froid.

- **Calculer la chaleur rejeter par le condenseur utiliser par TRNSYS**

- a. *Sans refroidissement adiabatique :*

La puissance thermique rejetée par le condenseur est généralement calculée par la formule :

$$Q_{cond} = \dot{m}_{air} \times C_p \times (T_{sc} - T_{ec}) \dots \dots \dots (14)$$

Q_{cond} : puissance thermique rejetée par le condenseur (W ou kW)

$\dot{m}_{air}$: débit massique d'air traversant le condenseur (kg/s)

C_p : capacité thermique massique de l'air (environ 1,005 kJ/kg·K)

T_{sc} : température de l'air en sortie du condenseur (°C)

T_{ec} : température de l'air en entrée du condenseur (°C)

- b. *Avec refroidissement adiabatique :*

Le refroidissement adiabatique abaisse la température de l'air en entrée du condenseur ($T_{ec,adiab}$) vers la température de bulbe humide, ce qui réduit la température moyenne du condenseur et donc la chaleur rejetée :

$$Q_{cond,adiab} = \dot{m}_{air} \times C_p \times (T_{sc} - T_{ec,adiab}) \dots \dots \dots (15)$$

Où

La température d'entrée après refroidissement adiabatique ($T_{ec,adiab}$) est calculée par :

$$T_{ec,adiab} = T_{ec} - \eta_{pad} \times (T_{ec} - T_{wb}) \dots \dots \dots (16)$$

η_{pad} : est l'efficacité du média adiabatique, caractérisant la capacité du système à abaisser la température de l'air vers la température de bulbe humide.

T_{wb} : est la température de bulbe humide de l'air ambiant.

L'efficacité du média adiabatique, η_{pad} , correspond à la capacité du système à abaisser la température de l'air en la rapprochant de la température de bulbe humide. Elle se calcule classiquement par la formule :

$$\eta_{pad} = \frac{T_{ec} - T_{wb}}{T_{ec} - T_{sc}} \dots \dots \dots (17)$$

• **Équations de transfert de masse pour refroidissement adiabatique dans TRNSYS.**

Les équations de transfert de masse appliquées par TRNSYS pour modéliser l'évaporateur adiabatique reposent sur les principes psychrométriques et les bilans massiques. Elles sont utilisées pour calculer la quantité d'eau évaporée et les variations d'humidité absolue.

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{air} \cdot \eta_{pad} \cdot (H_s - H_e) \dots \dots \dots (18)$$

$\dot{m}_{eau}$: Débit massique d'eau évaporée (kg/s)

$\dot{m}_{air}$: Débit massique d'air sec traversant le pad (kg/s)

H_s : Humidité absolue de l'air en sortie du tampon (kg_{eau}/kg_{air} sec)

H_e : Humidité absolue de l'air en entrée du tampon (kg_{eau}/kg_{air} sec)

La variation d'humidité absolue en sortie du tampon est donnée par :

$$H_s = H_e + \eta_{pad} \cdot (H_{sat}(T_{wb}) - H_e) \dots \dots \dots (19)$$

$H_{sat}(T_{wb})$: Humidité absolue à saturation à la température de bulbe humide

• **Calcul de la puissance frigorifique de l'évaporateur dans TRNSYS**

Les principales formules utilisées par TRNSYS pour calculer la puissance frigorifique de l'évaporateur (Q_{froid}) dans un système de climatisation sont :

$$Q_{froid} = \dot{m}_{air} \times C_p \times (T_{ev} - T_{sv}) \dots \dots \dots (20)$$

$\dot{m}_{air}$: débit massique d'air traversant l'évaporateur (kg/s)

C_p : capacité thermique massique de l'air (environ 1,005 kJ/kg·K)

T_{ev} : température de l'air en entrée du l'évaporateur (°C)

T_{sv} : température de l'air en sortie du l'évaporateur (°C)

• Modélisation du détendeur dans TRNSYS

Dans TRNSYS, le détendeur est modélisé comme une vanne d'expansion isenthalpique ($h_3 = h_4$). Il abaisse la pression du fluide frigorigène du niveau condenseur à celui de l'évaporateur, sans échange de chaleur ni de travail.

h_3 : enthalpie du fluide frigorigène à l'entrée du détendeur (sortie du condenseur)

h_4 : enthalpie du fluide frigorigène à la sortie du détendeur (entrée de l'évaporateur)

• Formules principales utilisées par TRNSYS pour la consommation électrique :

$$W_{total} = W_{comp} + W_{ventilateur} \dots \dots \dots (21)$$

W_{comp} : Puissance électrique absorbée par le compresseur (W)

$W_{ventilateur}$: Puissance électrique des ventilateurs (W)

Où :

W_{comp} est déterminé par :

$$W_{comp} = \frac{Q_{froid}}{COP} \dots \dots \dots (22)$$

- Dans TRNSYS, la puissance des ventilateurs peut être calculée dynamiquement selon le scénario de simulation et les caractéristiques du système.

Le COP est recalculé dynamiquement à chaque pas de temps, ce qui permet d'évaluer l'efficacité énergétique instantanée ou annuelle du système modélisé :

$$COP = \frac{Q_{froid}}{W_{total}} \dots \dots \dots (23)$$

Le bilan thermique réalisé met en évidence l'effet positif du refroidissement adiabatique sur le fonctionnement global du climatiseur. La réduction de la température de l'air au niveau du condenseur se traduit par une baisse significative de la consommation électrique et une

amélioration de l'efficacité énergétique du système. Cette approche démontre l'intérêt d'intégrer des solutions passives simples pour optimiser les performances dans les climats chauds.

III.2.3. Configuration du système simulé : Type 651-2

Pour cette simulation, le **Type 651-2** a été choisi afin de représenter le climatiseur split intégré au système de refroidissement. Bien que ce type soit généralement destiné à simuler un ventilateur ou un équipement de transfert d'air, il peut être adapté pour modéliser le fonctionnement d'un climatiseur en tenant compte de la variation de température entre l'entrée et la sortie de l'air.

Dans cette configuration, le Type 651-2 agit comme un bloc de refroidissement qui reçoit l'air préalablement traité par le module adiabatique et réduit sa température selon une différence thermique imposée ou une consigne basée sur la température intérieure souhaitée. Cette approche simplifie la modélisation du climatiseur tout en assurant un comportement réaliste fondé sur la variation thermique de l'air.



Figure 18: Schéma de la configuration du système de climatisation hybride modélisé sous TRNSYS

III.2.4. Description et fonctionnement du système adiabatique

Le Type 641 dans TRNSYS est un modèle d'humidificateur par évaporation, utilisé pour simuler les effets du refroidissement adiabatique direct. Ce composant représente un système dans lequel de l'air chaud et sec entre en contact avec de l'eau au sein de l'humidificateur, ce qui entraîne une augmentation de son humidité et une baisse de sa température, sans apport externe de chaleur.

Ce modèle est principalement employé dans les simulations de refroidissement adiabatique direct, où l'humidification de l'air permet une diminution significative de sa température. Il est particulièrement adapté aux études de systèmes de climatisation à haute efficacité énergétique, notamment dans les régions chaudes et sèches.

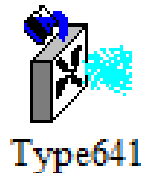


Figure 19: Schéma fonctionnel du système de refroidissement adiabatique modélisé avec le Type 641 sous TRNSYS

- **Fonctions principales :**

- Réduit la température de l'air en augmentant son humidité.
- Ne nécessite pas de compresseur ni de fluide frigorigène, ce qui en fait une solution écologique.
- Utilisé dans les simulations pour **améliorer le rendement énergétique global** du système de climatisation.

- **Paramètres d'entrée typiques :**

- Température, humidité et débit massique de l'air entrant.
- Efficacité de l'humidification ou taux de saturation.
- Conditions de fonctionnement (pression, température ambiante, etc.).

- **Application dans la simulation :**

Dans le cadre de ce projet, ce composant est utilisé pour refroidir l'air avant son passage dans le condenseur du climatiseur. Cette stratégie permet de réduire la température de condensation, d'optimiser le rendement du cycle de compression et de diminuer la durée de fonctionnement du compresseur, contribuant ainsi à une meilleure performance énergétique du système.

III.2.5. Représentation du montage dans TRNSYS

L'image ci-dessus illustre le schéma du système de simulation développé sous TRNSYS, destiné à étudier l'impact du refroidissement adiabatique sur la performance d'un climatiseur split. Ce montage permet de modéliser la réduction de la température de l'air extérieur avant son entrée dans le condenseur du climatiseur, grâce à un humidificateur évaporatif (Type 641).

- **Description des composants utilisés :**

- **Type 109 - TMY2** : Ce composant importe les données climatiques horaires issues d'un fichier TMY2 correspondant au site d'étude. Il fournit des informations essentielles telles que la température extérieure, l'humidité relative, la vitesse du vent, etc.
- **Type 641-2** : Humidificateur évaporatif simulant le refroidissement adiabatique direct. L'air extérieur traverse ce composant et voit sa température diminuer grâce à l'évaporation de l'eau.
- **Type 651-2** : Ce composant représente la sortie d'air après refroidissement ou un traitement intermédiaire avant le passage au composant suivant. Il permet de simuler la transmission de l'air vers le condenseur et d'analyser les résultats à ce stade.
- **Type 65c** : Outil graphique utilisé pour visualiser les résultats de simulation sous forme de courbes, notamment l'évolution de la température de l'air avant et après l'humidificateur.
- **System_Printer** : Composant permettant d'exporter les résultats numériques dans un fichier texte pour une analyse plus approfondie.

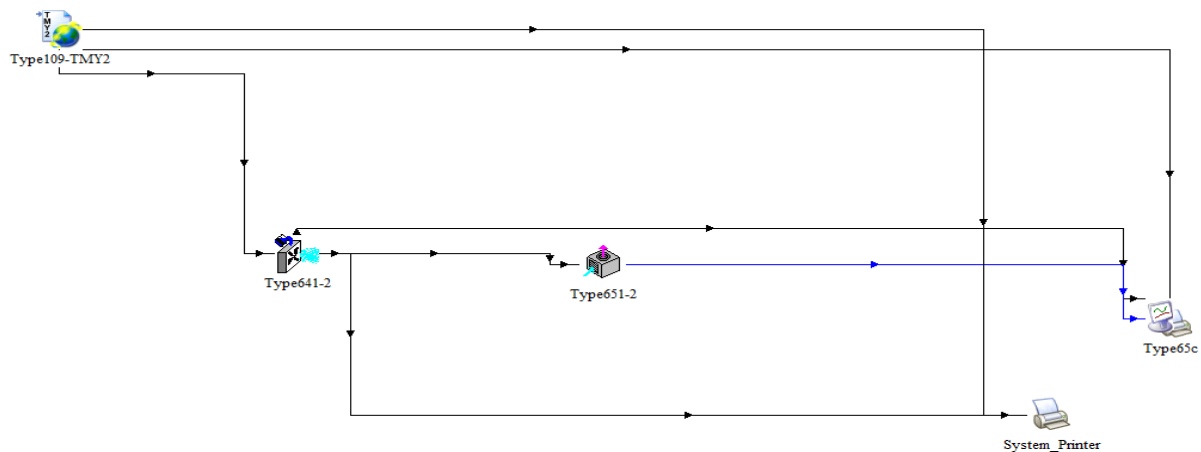


Figure 20: Schéma du montage de simulation TRNSYS du système de climatisation avec refroidissement adiabatique

III.2.6. Configuration des composants TRNSYS utilisés dans la simulation :

Une fois le schéma global du système établi, il est essentiel de configurer chaque composant (type) pour qu'il reflète les conditions réelles de fonctionnement. Les paramètres de chaque type sont ajustés selon les caractéristiques techniques du système étudié et les données climatiques du site.

1-Configuration de lien type109-TMY2→Type 641-2 :

Dans cette simulation, le Type109-TMY2 est utilisé comme source de données météorologiques. Il permet d'extraire des informations climatiques horaires à partir d'un fichier TMY2, qui contient les conditions typiques d'une année donnée pour un site spécifique. Le fichier sélectionné est :

- Nom du fichier : DZ-Bechar-605710.tm2
- Localisation : Béchar, Algérie
- Format : TMY2
- Période simulée : Une année complète (8760 heures)

Parmi les nombreuses variables disponibles dans ce fichier, seules deux sont extraites ici pour alimenter l'humidificateur :

-Température de l'air ambiant (dry bulb temperature) – utilisée en entrée du Type641.

-Humidité relative de l'air – également transmise au Type641 pour permettre un calcul réaliste du processus d'humidification adiabatique.

Le Type641 représente un humidificateur évaporatif adiabatique direct. Dans ce processus, l'air passe à travers un média humide sans échange de chaleur avec l'extérieur : la température sèche de l'air diminue tandis que son humidité relative augmente, mais l'enthalpie reste constante. Ce composant est configuré pour fonctionner en mode adiabatique direct.

Le couplage entre ces deux composants se fait via les ports de connexion :

-La température ambiante (sortie du Type109, la variable n°1) est connectée à l'entrée température du Type641.

-L'humidité relative (variable n°2) est connectée à l'entrée correspondante du Type641.

Ce lien permet au système de simuler le comportement de l'humidificateur en fonction des conditions réelles du climat chaud et sec de Béchar, particulièrement pertinentes pour une étude sur les performances d'un climatiseur dans une zone de plus de 50 °C.

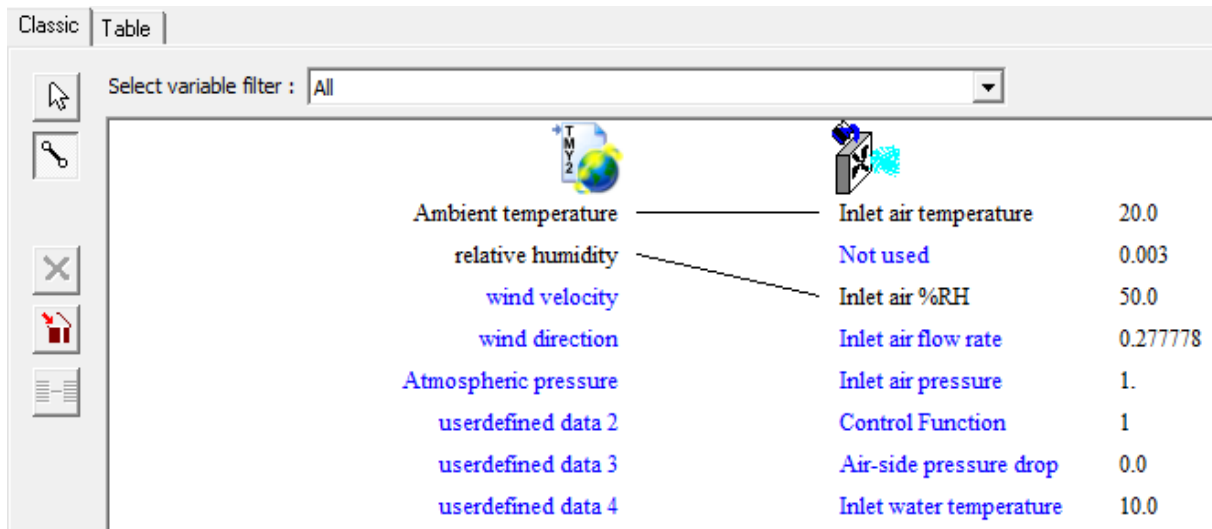


Figure 21: Configuration entre les données météorologiques et le tampon de refroidissement

2-Configuration de lien entre Type641-2→Type 651-2 :

Dans le schéma de simulation, le **Type641** joue le rôle d'un humidificateur adiabatique direct. Il traite l'air ambiant en abaissant sa température tout en augmentant son humidité spécifique, sans ajout de chaleur externe (processus adiabatique). L'air humidifié en sortie de ce module doit ensuite être transféré vers un autre composant pour une éventuelle distribution ou analyse. C'est le **Type651** qui assure cette fonction.

Le **Type651** représente un ventilateur ou un élément de soufflage d'air. Ce composant est utilisé pour faire circuler l'air traité dans le système ou pour simuler un débit d'air imposé. Il permet de maintenir un débit constant dans le circuit d'air, ce qui est essentiel pour assurer une régularité dans la simulation.

- Connexion entre les deux composants :

-Sortie du **Type641** (air humidifié) est directement connectée à l'entrée du **Type651**.

-Le **Type641** fournit les conditions thermodynamiques de l'air après humidification : température, humidité, débit massique.

-Le **Type651** utilise ces données pour simuler le transport de l'air à travers le système.

- Paramétrage spécifique :

-Le débit d'air est généralement fixé dans le **Type651** (kg/h), ce qui permet de contrôler la quantité d'air soufflée.

-Le ventilateur peut aussi introduire une petite élévation de température si l'on souhaite prendre en compte l'effet thermique du moteur, mais cela est souvent négligé dans une simulation adiabatique simplifiée.

Ce couplage est essentiel dans la chaîne de traitement de l'air : le **Type641** conditionne l'air selon les conditions climatiques réelles, et le **Type651** le transmet vers les étapes suivantes de la simulation (en général, un capteur, une zone, ou un autre échangeur). Il s'agit d'une configuration simple, mais représentative d'un système adiabatique de refroidissement d'air par évaporation, très utile pour simuler des applications dans les zones à climat chaud et sec.

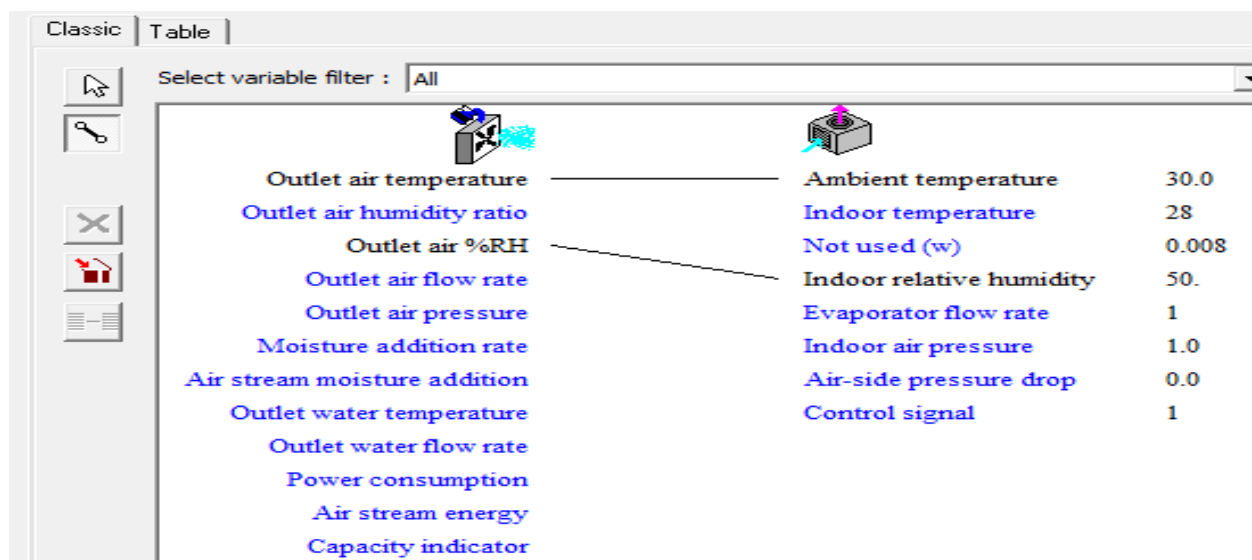


Figure 22: Configuration entre le tampon de refroidissement et le climatiseur

3-Configuration du lien entre Type 641-2 + Type 651-2 → Type 65c :

Dans cette configuration, les composants **Type641-2** et **Type651-2** sont connectés en série pour simuler le traitement et le transport de l'air dans un système de refroidissement adiabatique. Le composant **Type65c** est ensuite utilisé pour la visualisation des données simulées.

-**Type641-2** est un humidificateur adiabatique direct. Il reçoit l'air ambiant (provenant du **Type109-TMY2**) et effectue un traitement adiabatique sur cet air. En sortie, l'air est refroidi et sa teneur en humidité est augmentée.

-**Type651-2** est un ventilateur qui reçoit l'air humidifié du **Type641-2**. Il sert principalement à assurer la circulation de l'air traité dans le système en maintenant un débit constant. Ce composant transporte l'air vers la suite du montage sans altérer de manière significative ses propriétés thermodynamiques.

-**Type65c** est un composant de visualisation graphique. Il est connecté à la sortie du **Type651-2**. Ce lien permet d'enregistrer et d'afficher les grandeurs physiques issues de la simulation, telles que la température de l'air, l'humidité relative ou le débit, sous forme de courbes temporelles.

Ce chaînage permet de suivre l'évolution des propriétés de l'air après son passage dans l'humidificateur et le ventilateur, et de visualiser graphiquement ces données dans Type65c pour une analyse qualitative du comportement du système.

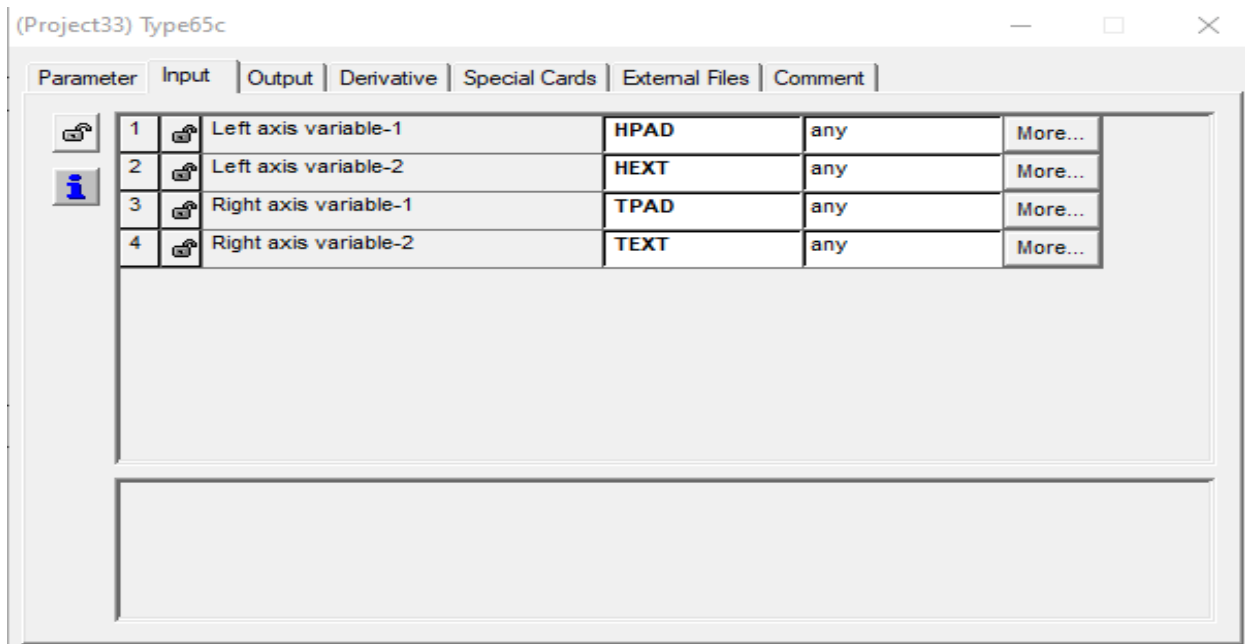


Figure 23: Configuration pour afficher les données

III.3. Partie expérimentale :

Dans le cadre de cette étude, nous avons mis en œuvre une approche expérimentale visant à évaluer l'impact de l'intégration d'un système de refroidissement adiabatique (tampon de refroidissement) sur les performances thermiques et énergétiques d'un climatiseur split à cycle de compression simple. Ce système agit par le refroidissement du condenseur de chaleur grâce à un tampon de refroidissement par évaporation. L'objectif est d'optimiser l'efficacité globale du climatiseur en synergie avec des sources d'énergie renouvelables, dans une perspective d'amélioration des solutions destinées aux bâtiments à basse consommation énergétique. Les essais ont été réalisés dans un environnement contrôlé, représentatif des conditions réelles d'utilisation, afin de valider la pertinence et l'efficacité des technologies testées. L'expérimentation s'appuie sur une plateforme de démonstration intégrée à une maison solaire conçue spécialement pour la recherche et le développement.

III.3.1. Maison solaire à basse consommation d'énergie

La maison solaire de l'Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES), située à Bou Ismaïl dans la région de Tipaza, est une structure expérimentale dédiée à l'étude et à l'optimisation des équipements énergétiques en conditions réelles. Avec une surface habitable de 57 m², elle est conçue pour permettre la réalisation de diverses expériences liées à l'efficacité énergétique et à l'utilisation des énergies renouvelables.

La maison présente une architecture compacte, avec une façade principale accueillante, agrémentée d'un petit jardin et d'une terrasse. Sur le toit, des panneaux solaires et un chauffe-eau solaire témoignent de son orientation vers l'autonomie énergétique. Un climatiseur est installé sur la façade Est de la maison, comme en témoignent les images, permettant ainsi de contrôler précisément les conditions climatiques intérieures lors des expérimentations. Les panneaux solaires, installés sur la toiture, alimentent ces systèmes, assurant ainsi une autonomie énergétique partielle, voire totale, selon les conditions climatiques.



Figure 24: Vue extérieure de la maison solaire expérimentale de l'UDES et positionnement du climatiseur sur la façade Est.

L'objectif principal de cette maison est d'évaluer l'efficacité énergétique de différentes technologies dans des conditions réelles de fonctionnement, tout en explorant la faisabilité de l'autoconsommation dans les foyers algériens. Elle constitue également une source précieuse de données permettant d'optimiser l'intégration des énergies renouvelables dans les bâtiments résidentiels [25].

III.3.2. Présentation du système de climatisation testé

La figure présentée illustre un climatiseur split de marque Brandt, modèle BTS12ETQN, utilisé dans l'étude. Ce système est conçu pour fonctionner à la fois en mode refroidissement et en mode chauffage.

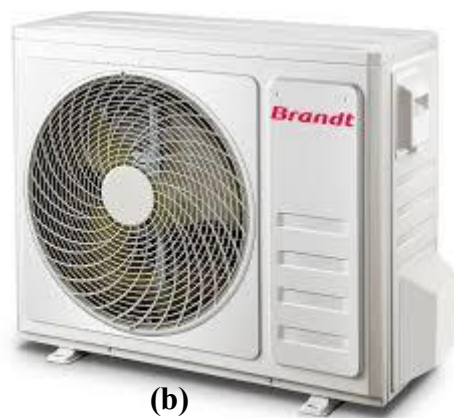
- **Unité intérieure :** L'image de gauche montre l'unité intérieure du climatiseur, qui s'installe à l'intérieur de la pièce à climatiser. Cette unité, de couleur blanche et de forme rectangulaire, est équipée d'une grille frontale par laquelle l'air conditionné est soufflé dans la pièce. Le logo « Brandt » est visible au centre de l'appareil. C'est cette unité qui assure la diffusion de l'air frais ou chaud selon le mode de fonctionnement sélectionné.
- **Unité extérieure :** L'image de droite présente l'unité extérieure du même climatiseur. Cette unité, également blanche, se distingue par la présence d'un large ventilateur visible à travers une grille circulaire. Le logo « Brandt » est apposé sur la partie supérieure droite de l'unité. Cette unité est installée à l'extérieur du bâtiment et joue un rôle essentiel dans l'échange thermique avec l'environnement extérieur.

Caractéristiques techniques du climatiseur présenté :

- Modèle : Brandt BTS12ETQN
- Modes de fonctionnement : Refroidissement et chauffage
- Capacité frigorifique : 12 000 BTU/h
- Capacité de chauffage : 13 000 BTU/h
- Fluide frigorigène : R410A
- Charge de fluide : 980 g



(a)



(b)

Figure 25: Photo du climatiseur split Brandt testé : (a) unité intérieure et (b) unité extérieure

III.3.3. Description du module de refroidissement utilisé dans l'étude

Cette figure illustre un module de refroidissement par évaporation utilisé dans le cadre de notre étude. Ce module est constitué d'une structure rigide en plastique blanc, conçue pour supporter un tampon évaporatif en nid d'abeille de couleur brune. Ce tampon, grâce à sa forme alvéolaire, augmente considérablement la surface de contact entre l'air et l'eau, favorisant ainsi une évaporation efficace et un refroidissement optimal.

Le tampon présente des dimensions approximatives de 60 cm de largeur, 50 cm de hauteur et 10 cm d'épaisseur, des mesures typiques pour ce type de refroidisseurs adiabatiques, assurant un compromis idéal entre performance et compacité. Sur le côté droit de la structure, une entrée d'eau est clairement visible : elle est équipée d'un raccord en PVC robuste, relié à un robinet manuel permettant de réguler précisément le débit d'eau circulant sur le tampon. Cette régulation est essentielle pour maintenir une humidification optimale du tampon, garantissant ainsi une efficacité maximale du processus d'évaporation.

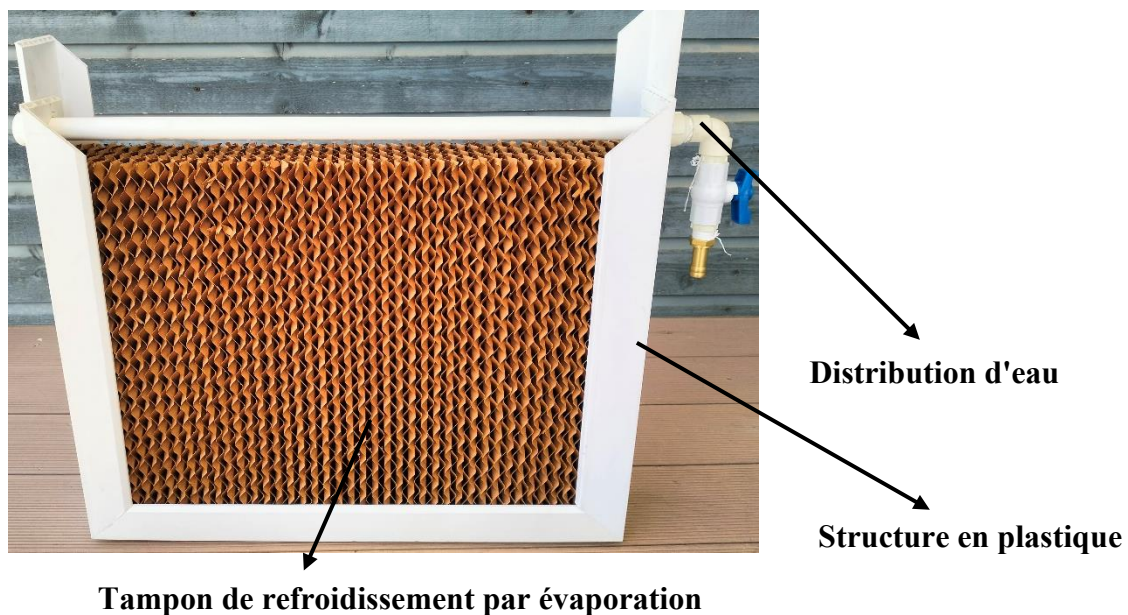


Figure 26: Module de refroidissement par évaporation avec tampon en nid d'abeille

III.3.4. Pompe submersible utilisée – Marque LEO :

Le modèle **XKP-6P** est une pompe compacte et performante conçue pour les systèmes de refroidissement adiabatique. Elle fonctionne avec une puissance absorbée de **0,06 kW** et offre un débit maximal de **360 litres par heure**, avec une hauteur de refoulement allant jusqu'à **3 mètres**. Grâce à sa **classe de protection IPX8**, elle est adaptée à un fonctionnement en milieu humide, ce qui la rend idéale pour l'alimentation en eau des tampons évaporatifs. Ce modèle se

distingue par sa faible consommation énergétique et sa fiabilité dans les systèmes à circulation continue (voir la figure 30).



Figure 27: Pompe LEO XKP-6P

III.3.5. Montage expérimental d'un climatiseur à évaporation

La figure présente en détail le montage expérimental d'un climatiseur à évaporation, un système de refroidissement naturel, économique et écoénergétique. Ce dispositif se compose principalement de deux unités distinctes — une unité extérieure et une unité intérieure — qui fonctionnent en parfaite synergie pour assurer un rafraîchissement efficace et durable de l'air intérieur.

- **Unité extérieure : le cœur du système de refroidissement adiabatique**

L'unité extérieure intègre un tampon de refroidissement par évaporation, communément appelé « pad évaporatif ». Ce tampon est constitué d'un matériau poreux, souvent en cellulose ou en fibres synthétiques, spécialement conçu pour être continuellement humidifié via un système d'arrosage automatique. L'eau est distribuée uniformément sur cette surface à l'aide d'un réseau de buses ou de goutteurs, alimenté par une pompe qui assure la circulation constante de l'eau entre un réservoir de stockage et le tampon.

Lorsque l'air chaud et sec provenant de l'extérieur est aspiré vers l'unité extérieure, il traverse ce tampon imbibé d'eau. Le contact entre l'air et l'eau provoque l'évaporation d'une partie de l'eau contenue dans le tampon. Ce phénomène d'évaporation est un processus endothermique, nécessitant un apport d'énergie thermique. Cette énergie est extraite sous forme de chaleur sensible de l'air ambiant, ce qui entraîne une diminution notable de la température de l'air traversant le tampon (Voir figure 31) .



Figure 28: Phototype expérimental

- **Description détaillée du processus de refroidissement**

- *Entrée d'air chaud et sec* : L'air extérieur, généralement chaud et à faible humidité, est aspiré par un ventilateur vers l'unité extérieure. Ce flux d'air est dirigé précisément vers le tampon humide, comme l'illustre la figure par une flèche indiquant la trajectoire de l'air.
- *Passage à travers le tampon imbibé d'eau* : Le tampon, saturé d'eau grâce au système d'arrosage, offre une large surface d'échange thermique et massique. L'air traverse ce matériau poreux, favorisant l'évaporation de l'eau.
- *Processus d'évaporation* : L'évaporation consomme de la chaleur latente, prélevée dans l'air sous forme de chaleur sensible, provoquant une baisse significative de la température de l'air tout en augmentant son humidité relative.
- *Sortie d'air refroidi et humidifié* : L'air qui sort du tampon est ainsi rafraîchi et humidifié. Ce flux d'air à température réduite est ensuite dirigé vers l'unité intérieure, où il est diffusé dans le bâtiment ou l'espace à climatiser, contribuant à un confort thermique accru.

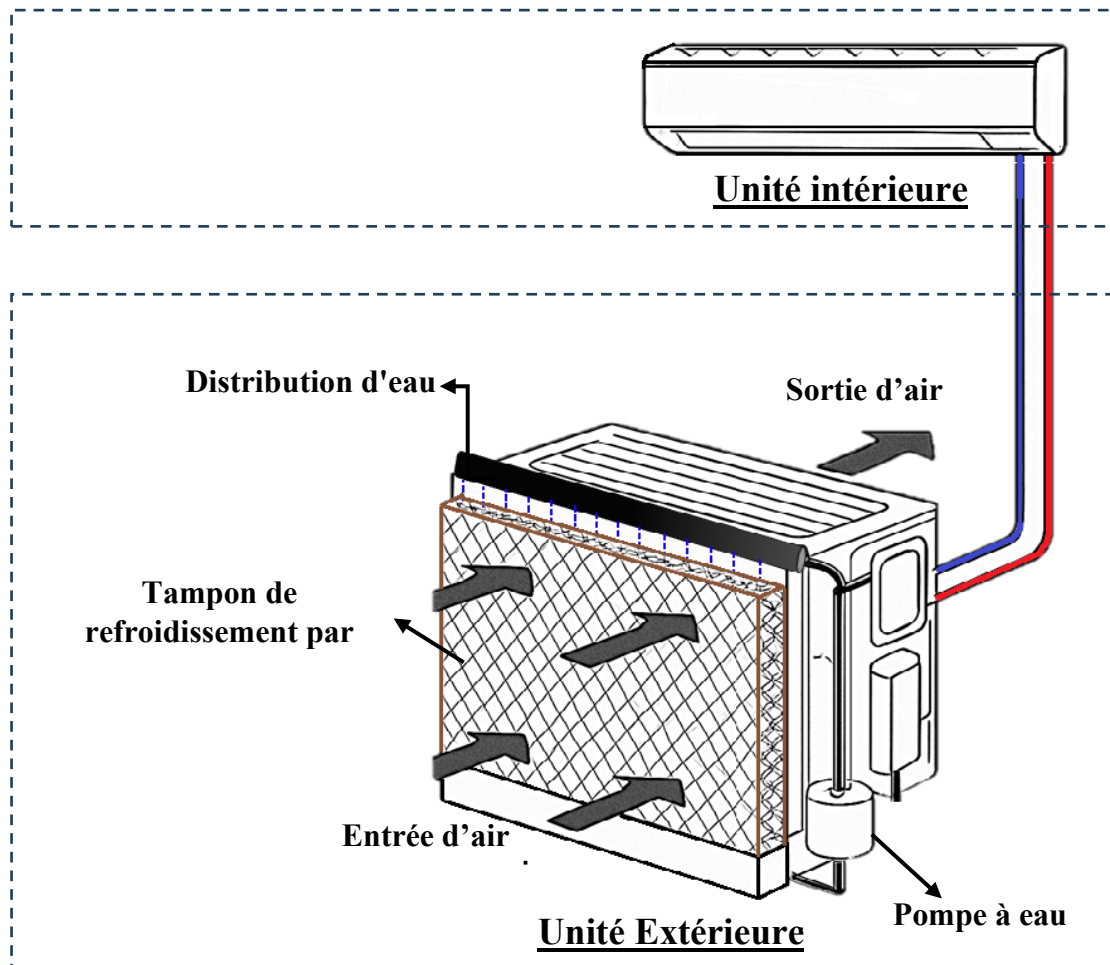


Figure 29: Schéma de fonctionnement du tampon de refroidissement par évaporation

III.3.6. Matérielle et mesure

Dans le cadre de cette étude expérimentale, le choix et la qualité du matériel employé sont essentiels pour garantir des résultats fiables et précis. Le matériel utilisé est décrit en détail dans les sections suivantes.

- **Systèmes de mesure de la température**

Les thermocouples sont parmi les capteurs de température les plus couramment utilisés dans l'industrie, en raison de leurs nombreux avantages techniques et économiques. Ils se distinguent par leur robustesse et leur capacité à fournir des mesures suffisamment précises pour une large gamme d'applications, même s'ils sont généralement moins précis que les capteurs résistifs. De plus, leur fonctionnement ne nécessite pas de courant d'excitation, ce qui simplifie leur intégration dans les circuits de mesure. (Voir la figure 31).

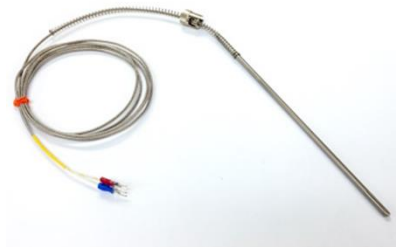


Figure 30: Photo de thermocouple

Les thermocouples existent sous différentes formes, chacune adaptée à des conditions spécifiques. Ils sont identifiés par une lettre unique, par exemple K, R, S, J, ou N. Dans cette étude, nous avons principalement utilisé des thermocouples de type K, qui offrent une précision d'environ $\pm 0,5$ °C. Ces capteurs ont été employés pour surveiller la température à l'intérieur d'un climatiseur.

Tableau 7: Descriptions des différents types de thermocouple

Type	Fil positif	Fil Négatif
B	70 % Platine	96 % Platine
	30 % Rhodium	6 % Rhodium
E	Chromel	Constantan
J	Fer	Constantan
K	Chromel	Alumel
N	Nicrosil	Nisil
R	87 % Platine	Platine
	13 % Rhodium	
S	90 % Platine	Platine
	10 % Rhodium	
T	Cuivre	Constantan

- **Description du système d'acquisition de données :**

Le HYDRA 2700 est un data logger multicanal conçu pour la mesure, l'enregistrement et le suivi de plusieurs grandeurs physiques telles que la température, l'humidité, la pression, la tension, le courant, etc. Il est couramment utilisé dans les laboratoires, les installations industrielles ou encore dans les projets de recherche pour effectuer des campagnes de mesure précises et fiables (voir la figure 34).



Figure 31: Data logger type Hydra 2700

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques techniques et fonctionnalités du data logger HYDRA 2700 utilisé pour l'acquisition et l'enregistrement des données dans notre étude.

Tableau 8: Caractéristiques techniques du data logger HYDRA 2700

Caractéristique	Détail
Nombre de voies (canaux)	Jusqu'à 21 canaux analogiques
Types de signaux mesurables	Température (thermocouples, RTD), tension, courant, résistance
Types de sondes supportées	Thermocouples de type J, K, T, E, R, S, B, N / Sonde PT100
Plage de mesure de température	Selon le type de thermocouple (ex. : type K de -200°C à 1370°C)
Résolution	Haute résolution 16 bits
Affichage	Écran LCD pour l'affichage instantané des valeurs
Mémoire interne	Mémoire non volatile pour enregistrement à long terme
Interface PC	Port série RS232 / USB via adaptateur / Compatible avec logiciel HydraView ou équivalent
Alimentation	Alimentation secteur ou batterie rechargeable

La figure 32 présente du data logger. La façade avant est équipée d'un écran LCD qui permet une utilisation autonome et manuelle de l'appareil. À l'arrière, on retrouve les connecteurs destinés au branchement des thermocouples ainsi qu'un port série assurant la liaison avec le micro-ordinateur. La figure suivante illustre l'interface graphique du data logger.

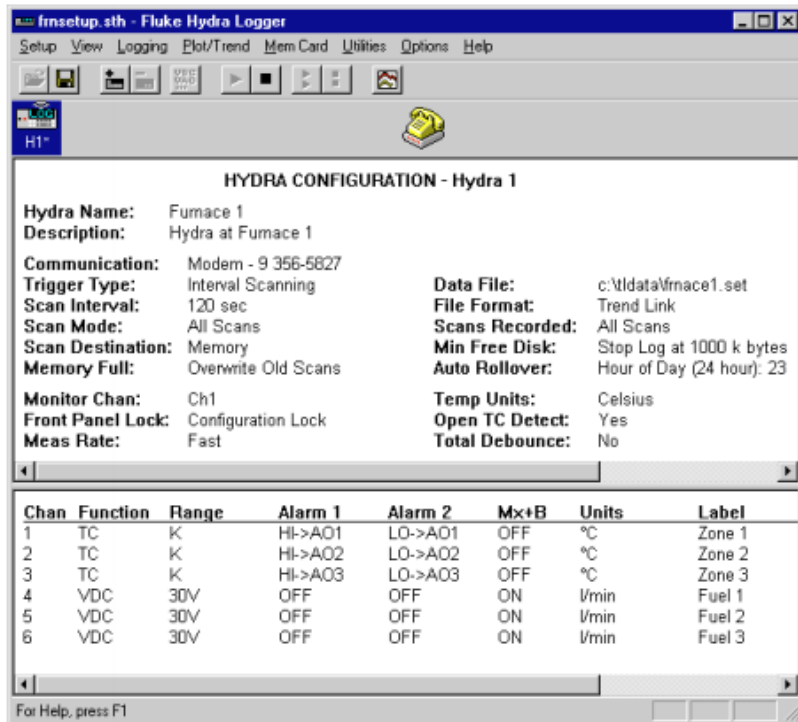


Figure 32 : Interface graphique du data logger.

- Pour mesurer l'humidité relative on a utilisé un deuxième data logger (Voir figure 36) :

Le **Testo 175 H1** est un enregistreur de données (data logger) conçu pour mesurer et enregistrer en continu la température et surtout l'humidité relative de l'air. Il est équipé d'un capteur d'humidité de haute précision qui permet de suivre l'évolution de l'humidité dans des environnements fermés ou contrôlés, comme les laboratoires, les salles de test ou les installations de conditionnement d'air.



Figure 33: Data logger Testo 175 H1

Les données sont enregistrées à intervalles réguliers et peuvent être extraites via un logiciel dédié pour une analyse détaillée. Ce type d'appareil est particulièrement utile pour évaluer l'efficacité des systèmes de refroidissement adiabatique, car il permet de quantifier l'augmentation de l'humidité relative induite par l'évaporation de l'eau.

- **Systèmes de mesure de consommation d'énergie :**

Un compteur électrique est un dispositif de mesure utilisé pour enregistrer la quantité d'énergie électrique consommée par un appareil ou un système sur une période donnée. Il est généralement exprimé en kilowattheure (kWh), qui est l'unité standard de mesure de l'énergie électrique (Voir la figure 37).

Dans le cadre de ce mémoire, un compteur électrique est utilisé pour mesurer la consommation du climatiseur split, avec ou sans système de refroidissement adiabatique, afin de comparer les performances énergétiques dans les deux configurations.



Figure 34: Photo de compteur électrique utilisée.

III.3.7. Description détaillée de la collecte des données expérimentales

Les données expérimentales ont été recueillies à partir d'un banc d'essai spécialement conçu pour simuler les conditions de fonctionnement d'un climatiseur split domestique. Afin d'assurer un environnement de test contrôlé, plusieurs paramètres clés ont été maintenus constants ou régulés avec précision. La température de l'eau d'alimentation circulant sur le tampon de refroidissement par évaporation, garantissant que ce dernier reste constamment humide, a été maintenue à une valeur stable de 22 °C. Parallèlement, la température intérieure des chambres de la maison solaire est variée entre 28 à 30 °C. Ces réglages permettent d'étudier l'impact des variations thermiques dans le compartiment principal sur les performances globales du système de climatisation. L'environnement ambiant extérieur a également été rigoureusement

contrôlé, avec une température maintenue à $30 \pm 1,5$ °C et une humidité relative constante de 70 %. Le climatiseur a été réglé pour maintenir une température intérieure de 17 °C afin de simuler des conditions réelles de confort thermique.

Deux scénarios principaux ont été utilisés pour les essais expérimentaux. Le cas de base correspond au fonctionnement du système de climatisation split, alimenté simultanément par le réseau électrique et les panneaux photovoltaïques (mode de fonctionnement 1 : climatisation sans module de refroidissement par évaporation). Dans le second mode, un module de refroidissement par évaporation a été ajouté et la recirculation d'eau activée pour assurer le pré-refroidissement de l'air circulant à travers le condenseur (mode 2 : climatisation + module de refroidissement par évaporation). Pour les étapes d'un test quotidien, celui-ci débute par l'activation de la pompe de recirculation d'eau (si nécessaire), responsable de l'humidification du tampon évaporatif. Afin d'assurer un mouillage complet du tampon avec 5 L d'eau, l'unité de climatisation est mise en marche à 12h30. La période de fonctionnement choisie s'étend de 12h30 à 16h30 (soit 4 heures), car durant cette plage horaire, la température ambiante atteint environ 30 °C, contrairement à la période matinale où elle varie entre 26 et 28 °C. Ce choix permet ainsi d'évaluer les performances de l'unité dans des conditions de chaleur plus élevées.

- **Système d'acquisition et suivi des données**

Pour garantir un suivi précis et continu des paramètres thermiques, un système d'acquisition de données a été mis en place. Ce système est relié à un ordinateur via une interface graphique dédiée, permettant à la fois l'affichage en temps réel des mesures et l'enregistrement automatique des données. Les relevés ont été effectués à intervalles réguliers de 60 secondes, assurant une résolution temporelle suffisante pour analyser finement les variations de température et le comportement thermique du banc d'essai. (Voir la figure 38).

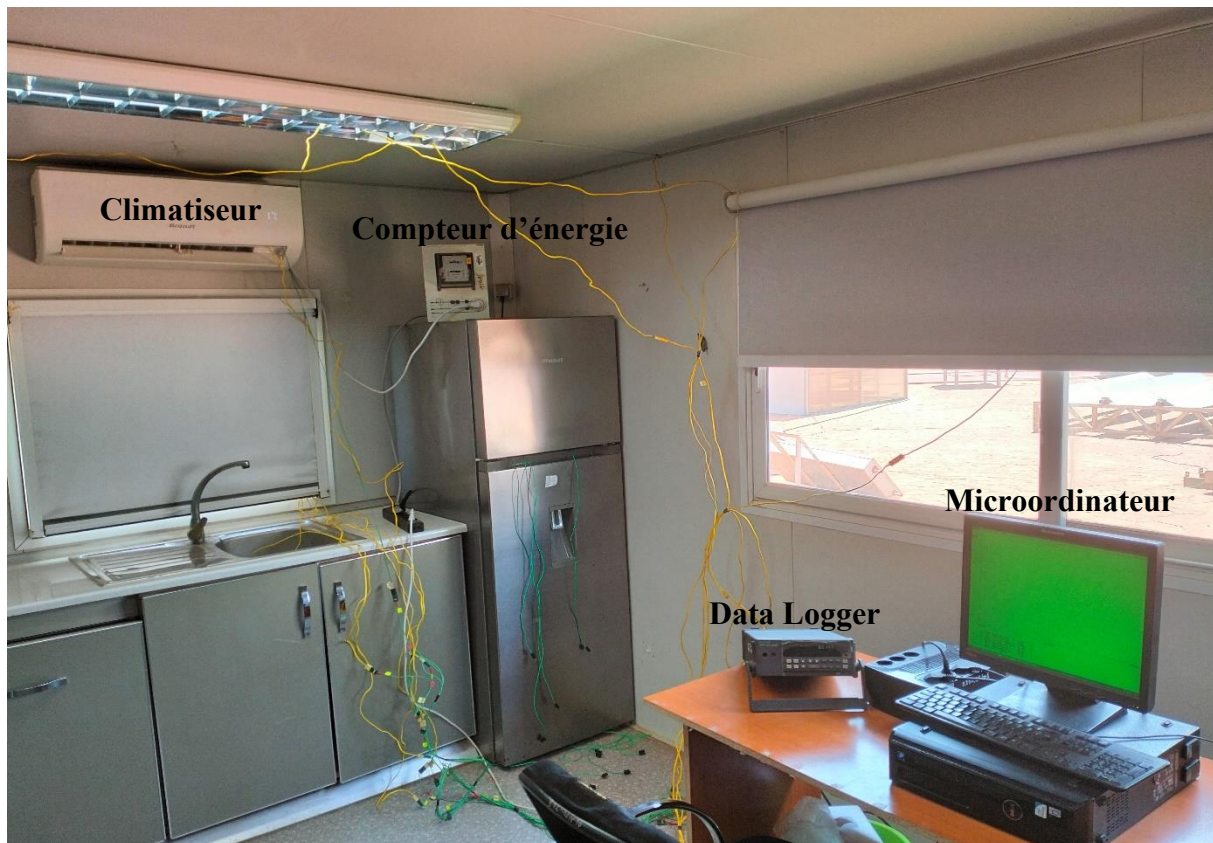


Figure 35: Banc d'essai pour l'étude thermique du climatiseur split domestique

- Les thermocouples mesurent la température à plusieurs points stratégiques du système, notamment : (Voir la figure 39).

T1 : À l'entrée d'air ambiant, avant le tampon évaporatif

T2 : À la sortie de la pompe, pour la température de l'eau

T3 : Avant le tampon évaporatif, sur l'air entrant dans le tampon

T4 : Au milieu du tampon évaporatif, pour suivre la température de l'air à mi-parcours

T5 : À la sortie du tampon évaporatif

T6 : À l'entrée de l'échangeur thermique (condenseur), avant le ventilateur

T7 : À la sortie de l'échangeur thermique (condenseur), après le ventilateur

T8 : À la sortie finale de l'air, vers l'extérieur ou l'espace à climatiser

À divers points de contrôle dans le circuit d'eau

- Capteurs d'humidité relative (RH) (Voir la figure 39).

Les capteurs d'humidité relative sont positionnés :

H1 : À l'entrée d'air ambiant, pour mesurer l'humidité de l'air extérieur

H2 : Au milieu du tampon évaporatif, pour suivre l'humidité de l'air dans le tampon

H3 : À la sortie du système, juste avant l'introduction de l'air dans la maison, afin de mesurer l'humidité de l'air conditionné

Cette organisation rigoureuse des mesures permet d'obtenir un diagnostic complet et précis des performances thermiques du système testé, en tenant compte des interactions entre les différentes variables environnementales et opérationnelles.

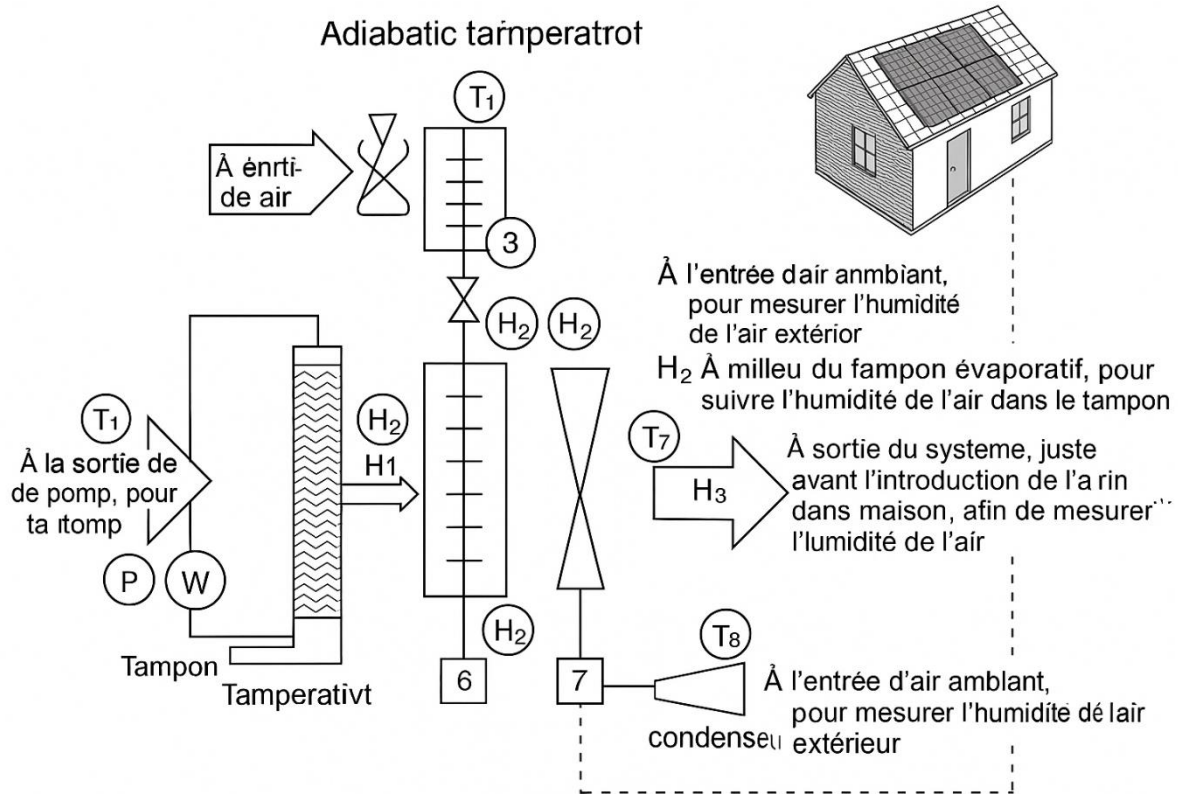


Figure 36: Schéma du montage expérimental avec emplacement des capteurs de mesure sur un climatiseur hybride solaire à pré-refroidissement adiabatique

III.4. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté une approche double, combinant simulation numérique et validation expérimentale, afin d'évaluer l'efficacité d'un système de climatisation hybride intégrant un refroidissement adiabatique par évaporation. La modélisation détaillée du comportement dynamique du système a été réalisée grâce au logiciel TRNSYS, mettant en lumière l'interaction entre le climatiseur split (modélisé via le Type 651-2 adapté) et le module de refroidissement adiabatique (Type 641), à partir de données climatiques représentatives de conditions extrêmes, telles que celles de Béchar en Algérie. La configuration précise des composants TRNSYS et de leurs interconnexions s'est avérée cruciale pour simuler de manière réaliste la réduction de la température de l'air entrant dans le condenseur.

Parallèlement, une campagne expérimentale menée dans la maison solaire de l'UDES a permis de confronter les résultats de simulation à des mesures réelles. Cette expérimentation, réalisée avec un climatiseur commercial (Brandt BTS12ETQN) couplé à un pad de refroidissement, visait à quantifier les gains thermiques et énergétiques obtenus grâce au pré-refroidissement adiabatique du condenseur. Cette démarche ancre l'étude dans une perspective pratique d'amélioration des solutions de climatisation pour les bâtiments à basse consommation, en explorant notamment les synergies avec les énergies renouvelables.

L'ensemble de ces travaux souligne le potentiel significatif du refroidissement adiabatique pour optimiser l'efficacité des systèmes de climatisation conventionnels, particulièrement dans les climats chauds et secs, ouvrant ainsi la voie à des solutions plus durables et économes en énergie

CHAPITRE IV

Résultats et discussion

IV.1. Introduction :

Le présent chapitre constitue le cœur de l'étude portant sur l'optimisation énergétique des systèmes de climatisation utilisant le refroidissement adiabatique. Après avoir exposé les bases théoriques et la méthodologie, ce chapitre analyse en profondeur les résultats obtenus par simulation numérique et expérimentation sur site. L'efficacité énergétique des systèmes de climatisation est un enjeu crucial dans le contexte actuel de transition énergétique et de réchauffement climatique, notamment dans des zones aux conditions climatiques extrêmes comme le sud algérien. L'étude se focalise sur l'impact du refroidissement adiabatique par Tampon de refroidissement sur les performances d'un climatiseur conventionnel, comparant deux zones climatiques distinctes : Béchar (climat désertique sec) et Dar El Beïda (climat côtier humide).

Le chapitre s'articule autour de deux axes principaux :

- La modélisation numérique sous TRNSYS, analysant les variations de température, d'humidité relative, de consommation énergétique et de chaleur rejetée par le condenseur selon différents scénarios, afin d'évaluer l'influence des conditions climatiques locales sur l'efficacité du système hybride proposé.
- Une investigation expérimentale sur un système de climatisation split installé dans une maison solaire, visant à mesurer précisément l'effet du refroidissement adiabatique sur les performances thermodynamiques. Plusieurs paramètres clés sont mesurés, notamment la température et l'humidité de l'air, la température de l'évaporateur, la fréquence des cycles ON/OFF du compresseur, la consommation d'eau du tampon adiabatique et la consommation électrique du climatiseur, comparant deux modes : sans et avec refroidissement adiabatique. Les expériences, menées dans des conditions climatiques contrôlées, visent à démontrer les bénéfices potentiels de cette technologie dans un contexte résidentiel alimenté par énergie solaire, fournissant des données fiables pour les analyses ultérieures.

Cette approche s'inscrit dans la recherche d'une solution écologique et économique, le refroidissement adiabatique étant reconnu pour ses capacités à réduire la consommation électrique, à améliorer la qualité de l'air intérieur et à s'adapter aux exigences de la transition énergétique, notamment dans des climats extrêmes.

IV.2. Présentation des systèmes simulie :

Description des différents cas étudier :

IV.2. 1 Scenario 1 : Fonctionnement de climatiseur Sans Tampon de refroidissement :

Ce premier scénario représente le fonctionnement du climatiseur en conditions normales, sans l'ajout d'un système de pré-refroidissement par évaporation. L'air ambiant entre directement dans le condenseur à la température extérieure fournie par le fichier climatique DZ-Bechar-605710.tn2. L'objectif est d'observer les conditions climatiques naturelles (température ambiante et humidité relative) ainsi que le comportement énergétique du climatiseur en situation réelle, sans amélioration du système.

Dans cette configuration de base, une comparaison a été réalisée entre deux localisations climatiques distinctes : Béchar et Dar El Beïda. Ces deux régions présentent des profils thermiques et hygrométriques très différents. Ainsi, les paramètres observés dans ce scénario incluent :

- La température de l'air extérieur,
- L'humidité relative de l'environnement,
- Et la consommation électrique estimée du climatiseur dans chaque zone.

Cette analyse comparative permet de mieux comprendre l'impact des conditions climatiques locales sur le rendement du climatiseur en fonctionnement classique (sans refroidissement adiabatique), et de justifier l'intérêt de solutions adaptées aux régions à fortes chaleurs.

Afin de visualiser les écarts entre les deux zones climatiques étudiées, les graphiques suivants ont été générés à l'aide du logiciel MATLAB. Ils permettent de comparer l'évolution horaire de la température extérieure, de l'humidité relative, ainsi que de la consommation électrique estimée du climatiseur en fonctionnement normal (sans tampon de refroidissement), pour les villes de Béchar et Dar El Beïda. Chaque figure est accompagnée d'une analyse détaillée permettant d'interpréter les résultats et de souligner l'influence des conditions climatiques locales sur les performances du système.

A-Comparaison de la température extérieure entre Béchar et Dar El Beïda :

En ce qui concerne la température de l'air en amont du condenseur, Béchar enregistre des valeurs moyennes de **47,2 °C**, contre **37,8 °C** à Dar El Beïda, soit un écart de **9,4 °C** représentant une différence relative d'environ **24,9 %** (Voir figure 40). Malgré cette température extérieure plus élevée, le système de climatisation à Béchar montre une meilleure capacité de dissipation thermique grâce à l'air sec. À Dar El Beïda, l'humidité élevée pénalise l'efficacité du condenseur, obligeant le système à fonctionner avec une pression de condensation plus élevée malgré des températures plus modérées. Cette situation démontre que **la température extérieure seule ne suffit pas à estimer la charge thermique**, et qu'il faut impérativement intégrer le facteur hygrométrique dans l'évaluation des performances.

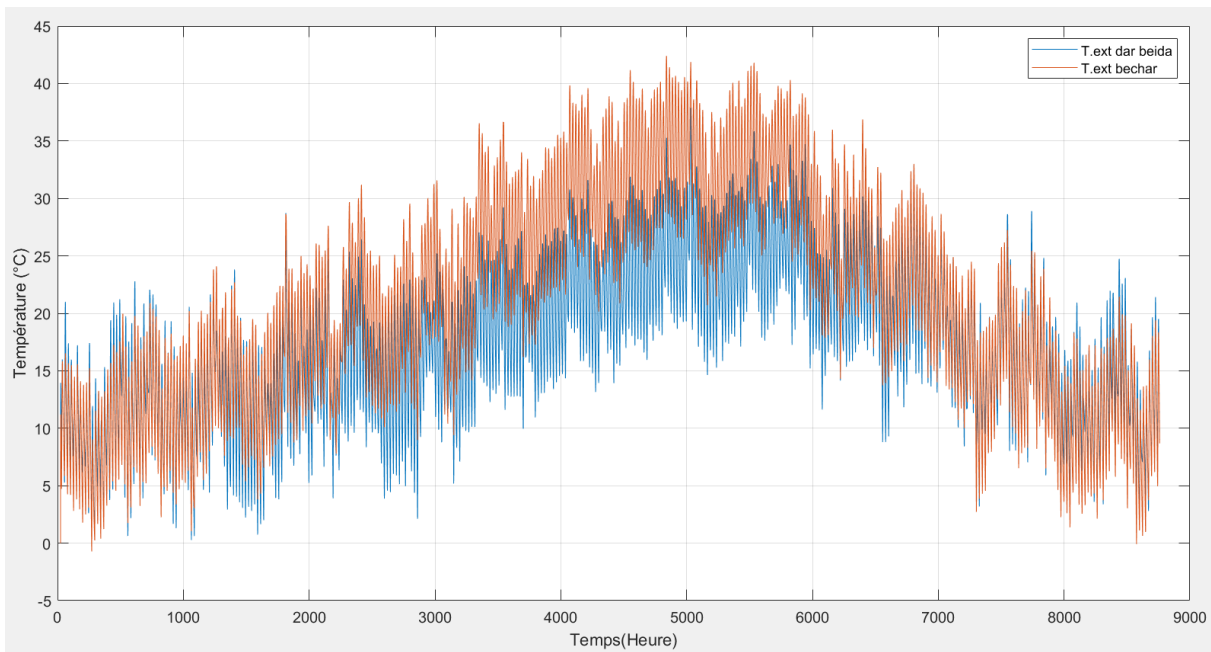


Figure 37: Température horaire sur une année a Bechar et Dar beida

B- Humidité relative :

L'humidité relative extérieure présente un contraste marqué entre les deux sites. À Béchar, l'humidité reste très faible, avec des valeurs moyennes autour de **25 %**, tandis qu'à Dar El Beïda, elle atteint fréquemment **75 %**, soit une différence absolue de **50 points**, équivalente à une augmentation de **200 %** (Voir figure 41). Cette humidité élevée à Dar El Beïda réduit fortement le potentiel d'échange thermique avec l'air ambiant, car celui-ci est déjà saturé en vapeur d'eau. À l'inverse, l'air sec de Béchar constitue un excellent vecteur d'évacuation de chaleur, ce qui explique pourquoi, malgré des températures extérieures plus élevées, les

performances du système y sont globalement meilleures. Ainsi, l'impact de l'humidité sur le système est tel qu'il peut **tripler la résistance à l'échange thermique** dans des conditions côtières humides.

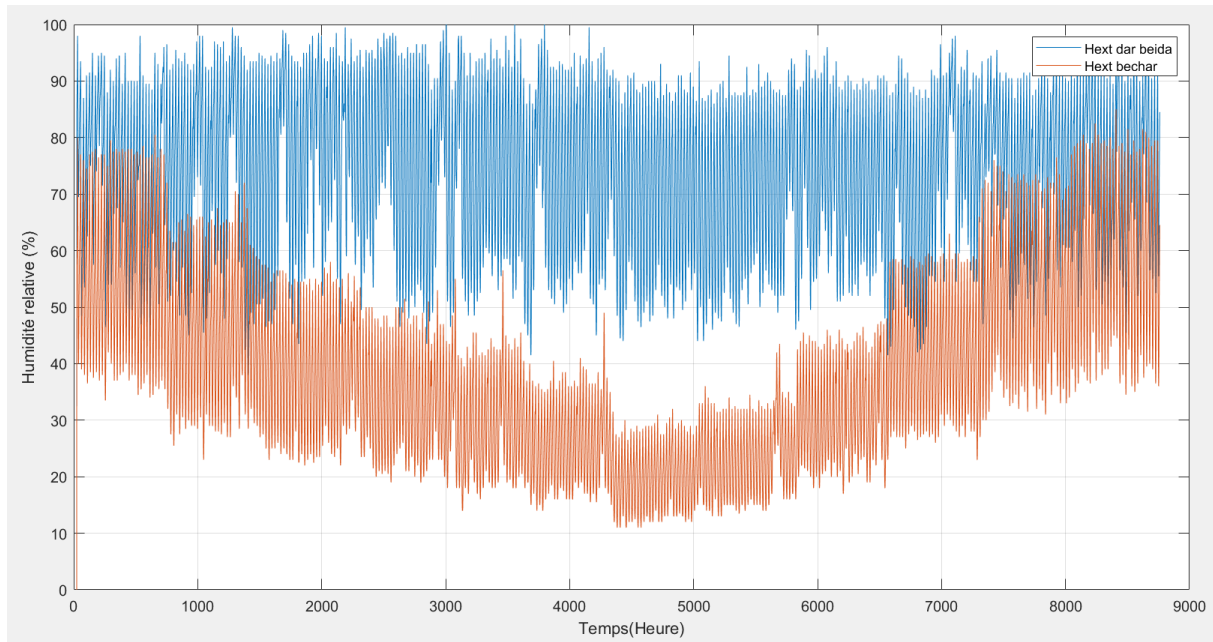


Figure 38: Humidité relative horaire à Béchar et Dar El Beida sur une année

C-La consommation électrique :

Le graphe de consommation énergétique horaire (en kW) révèle une différence significative entre les deux régions climatiques étudiées (Voir figure 42). À Béchar, la consommation présente des pics atteignant **1.00 kW**, avec une moyenne autour de **0.827 kW**. En comparaison, à Dar El Beïda, les valeurs sont nettement plus stables et maintenues autour de **0.744 kW**, avec très peu de pics dépassant **0.833 kW**. L'écart moyen observé entre les deux courbes est de l'ordre de **0.083 kW**, ce qui représente une surconsommation d'environ **11,2 %** à Béchar. Cette consommation plus élevée à Béchar s'explique par les températures extérieures extrêmement élevées, qui accroissent fortement la charge thermique à compenser par le climatiseur. En revanche, Dar El Beïda, bien que plus humide, présente des températures plus modérées, ce qui réduit légèrement la demande énergétique, malgré l'effet pénalisant de l'humidité sur les échanges thermiques. Cette comparaison met en lumière que dans un climat désertique sec comme celui de Béchar, la température extérieure devient le facteur dominant, pouvant entraîner une augmentation de la consommation énergétique supérieure à 10 % par rapport à une zone côtière plus humide mais plus tempérée.

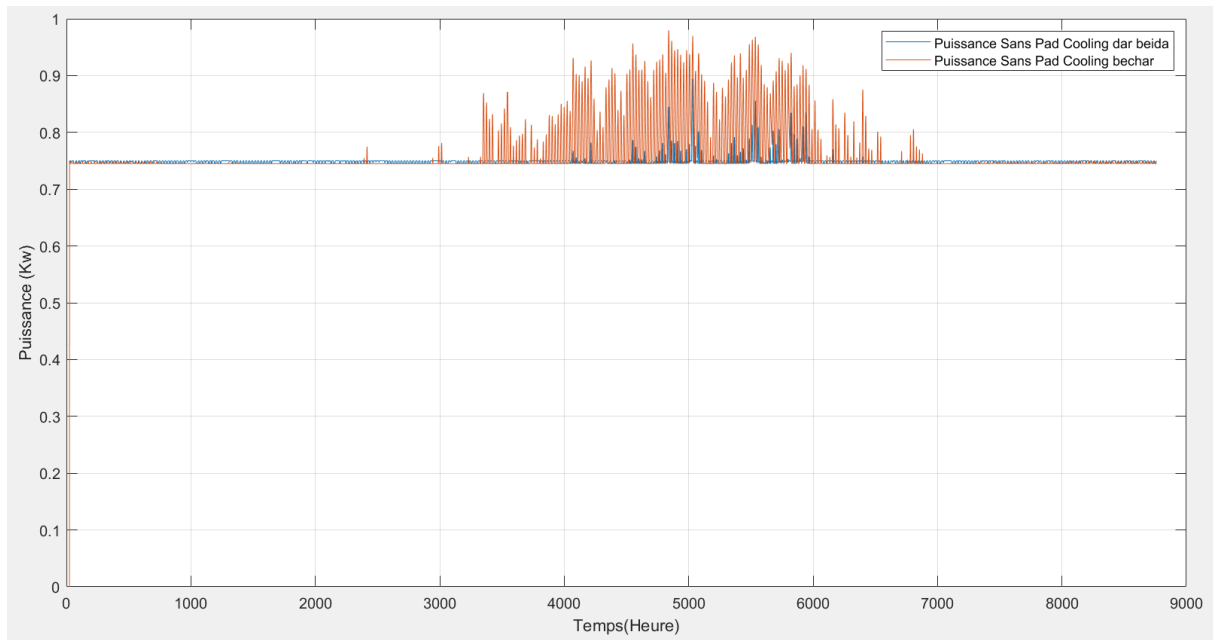


Figure 39: Consommation horaire du climatiseur à Béchar et Dar El Beïda (en kW)

D-Chaleur rejetée par le condenseur (en kW) :

La figure ci-dessus représente l'évolution de la quantité de chaleur rejetée par le condenseur (en kW) dans deux localités différentes :

L'analyse de la quantité de chaleur rejetée par le condenseur (en kW) met en évidence une différence notable entre les deux zones climatiques. À Dar El Beïda, la chaleur moyenne rejetée est d'environ **4.861 kW**, contre **4.527 kW** à Béchar, soit un écart de **0.333 kW**, représentant une augmentation d'environ **7,4 %**. Cette différence est principalement due à l'humidité plus élevée à Dar El Beïda, qui diminue l'efficacité des échanges thermiques dans le condenseur.

En conséquence, le compresseur travaille plus intensément, ce qui augmente la quantité totale de chaleur à dissiper. À l'inverse, à Béchar, le climat sec favorise une dissipation thermique plus rapide, réduisant ainsi la charge thermique du condenseur. Cette comparaison souligne l'influence directe de l'humidité sur le comportement énergétique du système frigorifique, avec une surcharge thermique pouvant atteindre près de **8 %** dans les zones humides.

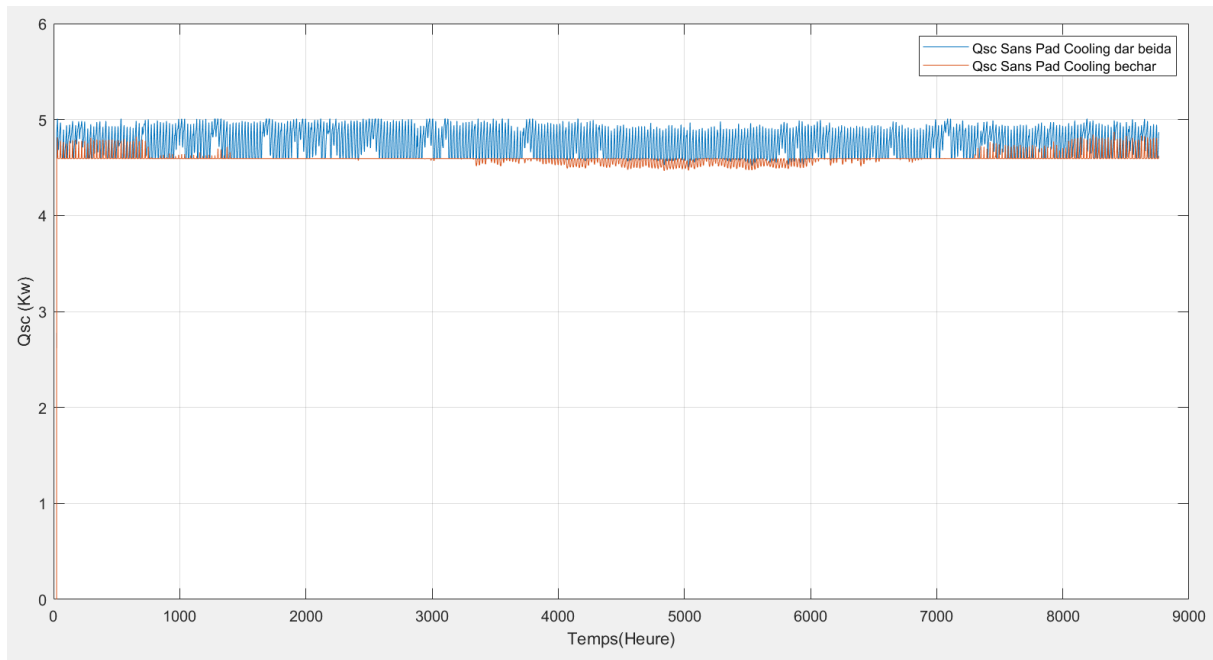


Figure 40: Chaleur rejetée par le condenseur (en kW)

IV.2. 2 Scenario 2 : Fonctionnement de climatiseur avec Tampon de refroidissement :

Dans ce deuxième scénario, le système de climatisation est étudié avec l'intégration d'un refroidissement adiabatique par Tampon de refroidissement au niveau de l'entrée d'air du condenseur. Cette configuration vise à réduire la température de l'air ambiant entrant dans le condenseur en utilisant le principe de l'évaporation adiabatique, ce qui améliore l'efficacité de l'échange thermique et diminue la charge thermique sur le compresseur.

A-Comparaison entre température extérieure et la température de la sortie de Tampon de refroidissement dans Béchar et Dar El Beïda :

Dans le cadre du second scénario, l'introduction du système de refroidissement par pad adiabatique a permis d'observer une amélioration notable du comportement thermique du climatiseur dans les deux régions étudiées, à savoir Béchar (zone aride) et Dar El Beïda (zone côtière) (Voir figure 44). L'analyse comparative des courbes de température a mis en évidence une diminution significative de la température de l'air en amont du condenseur. À Béchar, la température moyenne de l'air avant condenseur est passée de **47,2 °C** (sans pad) à **39,6 °C** (avec tampon de refroidissement), soit une réduction d'environ **7,6 °C**, ce qui représente une amélioration thermique de plus de **16 %**.

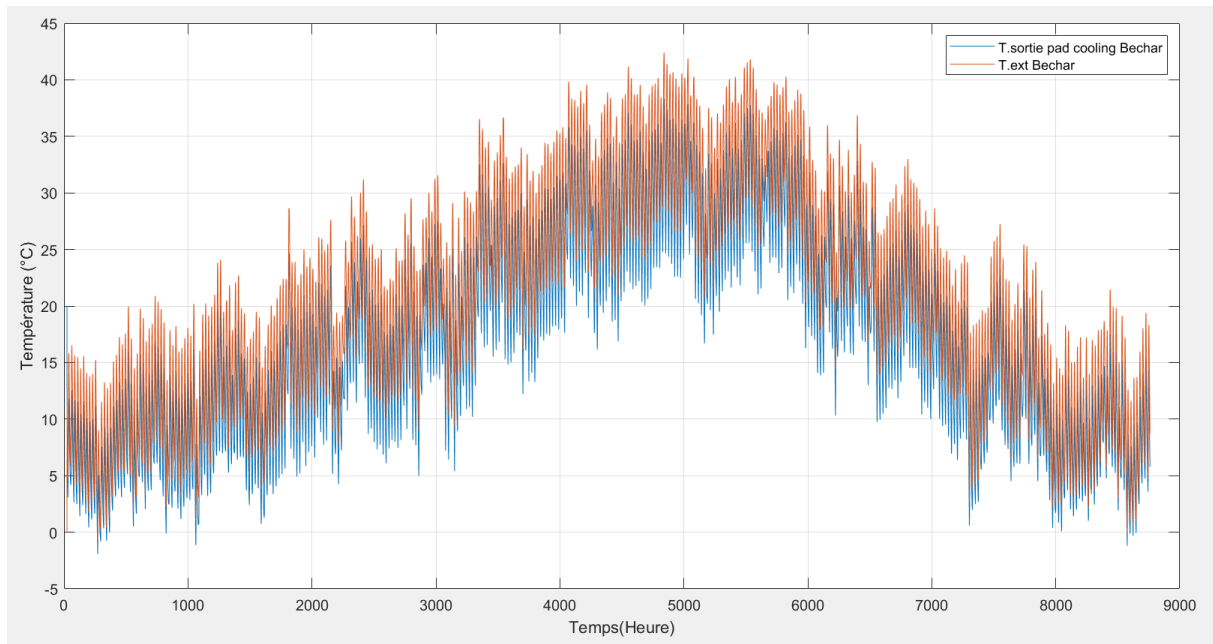


Figure 41: Graphe représente la température ambiante et la température à la sortie du pad (Bechar)

À Dar El Beïda, la température est passée de **37,8 °C (sans pad)** à **34,2 °C (avec pad)**, soit un écart de **3,6 °C** correspondant à une amélioration de près de **9,5 %** (Voir figure 45). Cette différence de performance s'explique par le fait que le refroidissement adiabatique est d'autant plus efficace quand l'air est sec, ce qui est le cas à Béchar, où l'humidité relative est inférieure à **20 %** en été, contre des valeurs souvent supérieures à **60 %** à Dar El Beïda. Ainsi, le pad évaporatif réduit plus efficacement la température de l'air à Béchar grâce à un potentiel d'évaporation plus élevé, limitant la charge thermique sur le condenseur et améliorant son efficacité globale. Cette comparaison met en évidence que l'intégration d'un système de refroidissement adiabatique présente un intérêt nettement supérieur dans les zones à climat sec comme Béchar.

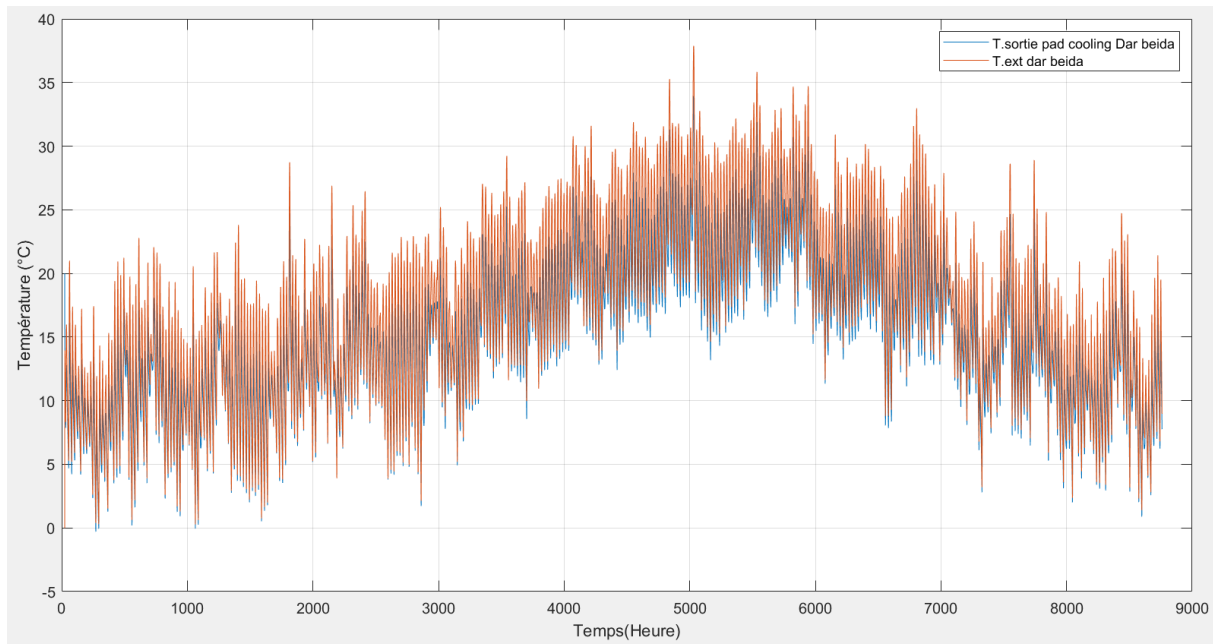


Figure 42: Graphe représente la température ambiante et la température à la sortie du pad (D. Beïda)

B-Comparaison entre l'humidité extérieure et l'humidité de la sortie de Tampon de refroidissement dans Béchar et Dar El Beïda :

L'analyse comparative de l'humidité relative à l'entrée et à la sortie du système de refroidissement adiabatique met en évidence des différences notables entre les deux régions étudiées, Béchar et Dar El Beïda (Voir figure 46). À Béchar, zone à climat aride, l'humidité relative extérieure moyenne est très basse, souvent inférieure à **30 %**, ce qui permet au système adiabatique d'augmenter efficacement l'humidité de l'air à la sortie du tampon. En effet, on observe une élévation significative de l'humidité relative atteignant des pics supérieurs à **80–90 %**, ce qui témoigne d'une évaporation intense liée à la forte capacité hygroscopique de l'air sec. Cette augmentation est visible sur le graphe correspondant, où la courbe bleue (avec tampon de refroidissement) est nettement supérieure à la courbe rouge (sans tampon) sur l'ensemble de la période.

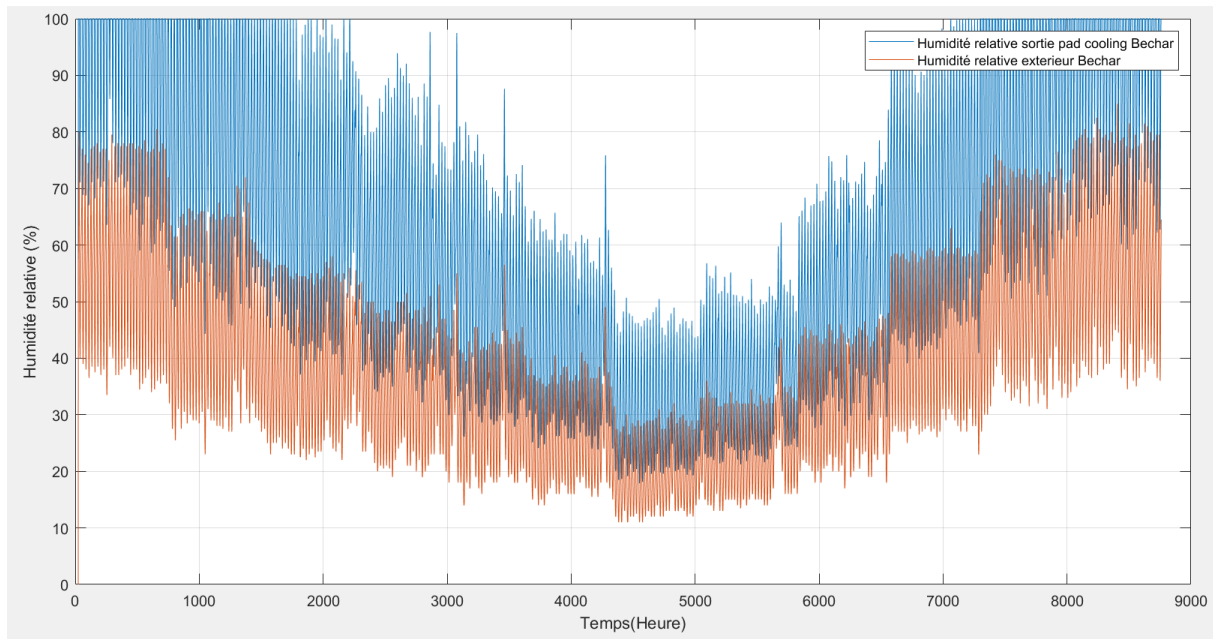


Figure 43: Graphe représente humidité extérieur et humidité à la sortie du pad (Béchar)

En revanche, à Dar El Beïda, région plus humide, l'humidité extérieure est déjà élevée, oscillant entre **60 %** et **90 %**, limitant ainsi le potentiel évaporatif du tampon (Voir figure 47). L'augmentation de l'humidité à la sortie du tampon est donc plus modérée, avec des gains souvent inférieurs à **10–15 %** par rapport à l'air extérieur. Ces résultats confirment que le rendement hygrométrique du système adiabatique est fortement dépendant du climat local, et qu'il est particulièrement efficace dans les environnements secs comme Béchar, où l'air a une grande capacité à absorber de la vapeur d'eau, contribuant ainsi à un refroidissement plus performant.

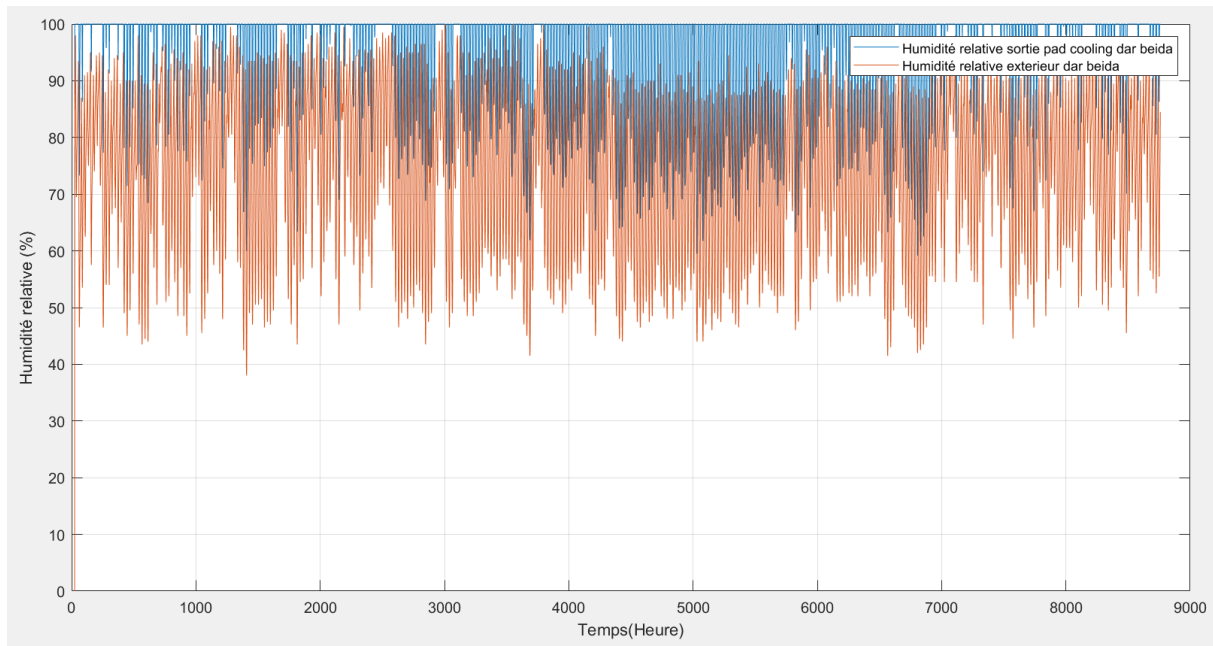


Figure 44: Graphe représente humidité extérieur et humidité à la sortie du pad (D. Beïda)

C- Comparaison des résultats de la consommation électrique du compresseur (avec-sans) Tampon de refroidissement dans les deux régions :

Les graphiques comparant la consommation énergétique (**en kW**) d'un compresseur de climatiseur dans deux régions d'Algérie aux climats distincts révèlent des différences marquées. À Béchar (climat sec), la consommation avec tampon de refroidissement (courbe rouge) varie entre **0.555** et **0.708 kW** en raison des températures élevées et de la faible humidité, tandis qu'sans Tampon de refroidissement (courbe bleu), elle chute entre **0.555** et **0.777 kW**, démontrant une efficacité optimale grâce à l'évaporation adiabatique. (Voir figure 48)

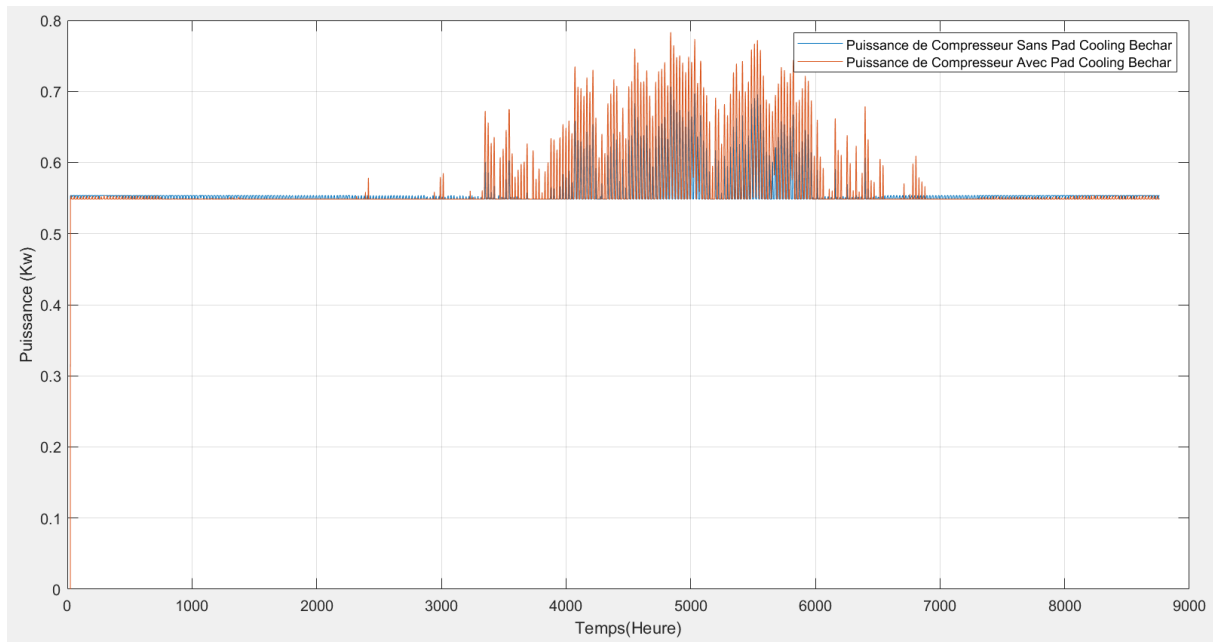


Figure 45: Graphe représente la consommation énergétique du compresseur à Béchar

En revanche, à Dar Beida (climat humide), bien que le Tampon de refroidissement réduise aussi la consommation (**0.555–0.638 kW**), son impact est moindre en raison de l'humidité ambiante élevée qui limite le refroidissement par évaporation. (Voir figure 49)

Ces résultats soulignent que le Tampon de refroidissement est bien plus performant en climat aride comme Béchar, où il permet des économies d'énergie significatives, alors qu'en milieu humide comme Dar El Beïda, son efficacité, bien que réelle, est atténuée. Ainsi, l'adaptation des systèmes de refroidissement aux conditions climatiques locales s'avère essentielle pour maximiser l'efficacité énergétique des climatiseurs.

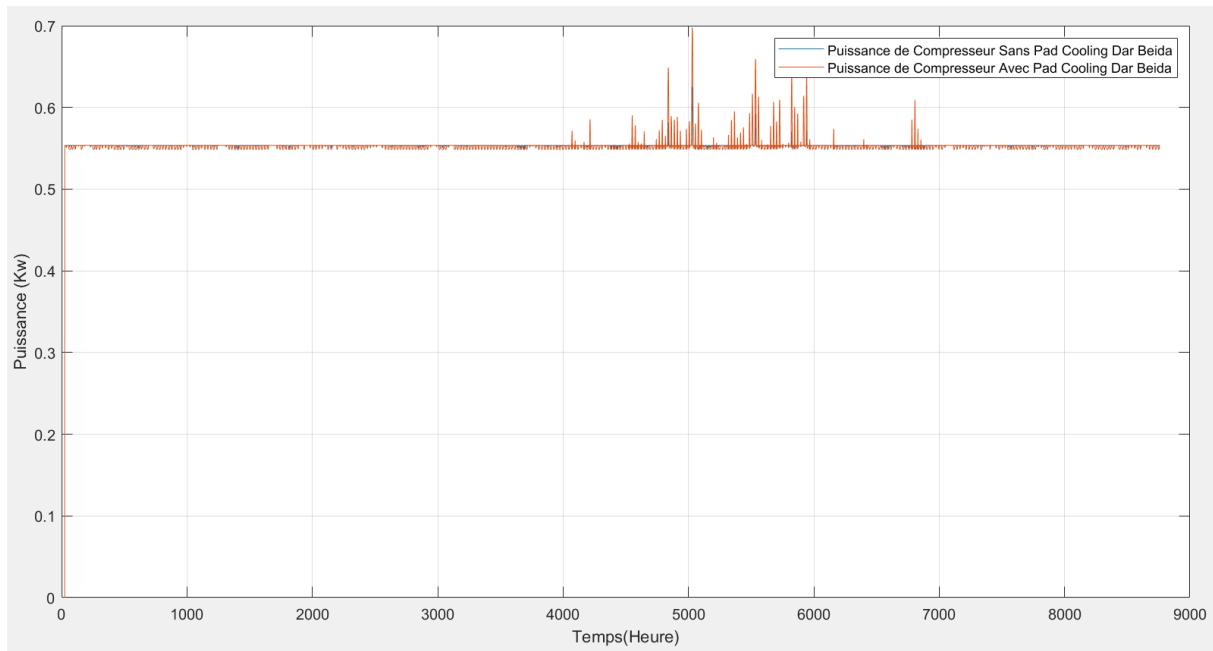


Figure 46 : Graphe représente la consommation énergétique du compresseur à D. Beida

D- Chaleur rejeté par le condenseur dans les deux régions :

Les graphes comparatifs de la quantité de chaleur rejetée par le condenseur (Q_{sc}) mettent en évidence l'effet positif de l'intégration du Tampon de refroidissement dans les deux régions climatiques étudiées. (Voir figure 50)

À **Béchar**, on constate une réduction nette de la chaleur évacuée lorsque le pad est activé (courbe bleue), avec une diminution moyenne de l'ordre de **0.416 kW**, soit une baisse d'environ **8,5 %** par rapport au fonctionnement sans pad (courbe rouge). Cette amélioration s'explique par le refroidissement de l'air en amont du condenseur, ce qui réduit la pression de condensation et la charge thermique à dissiper.

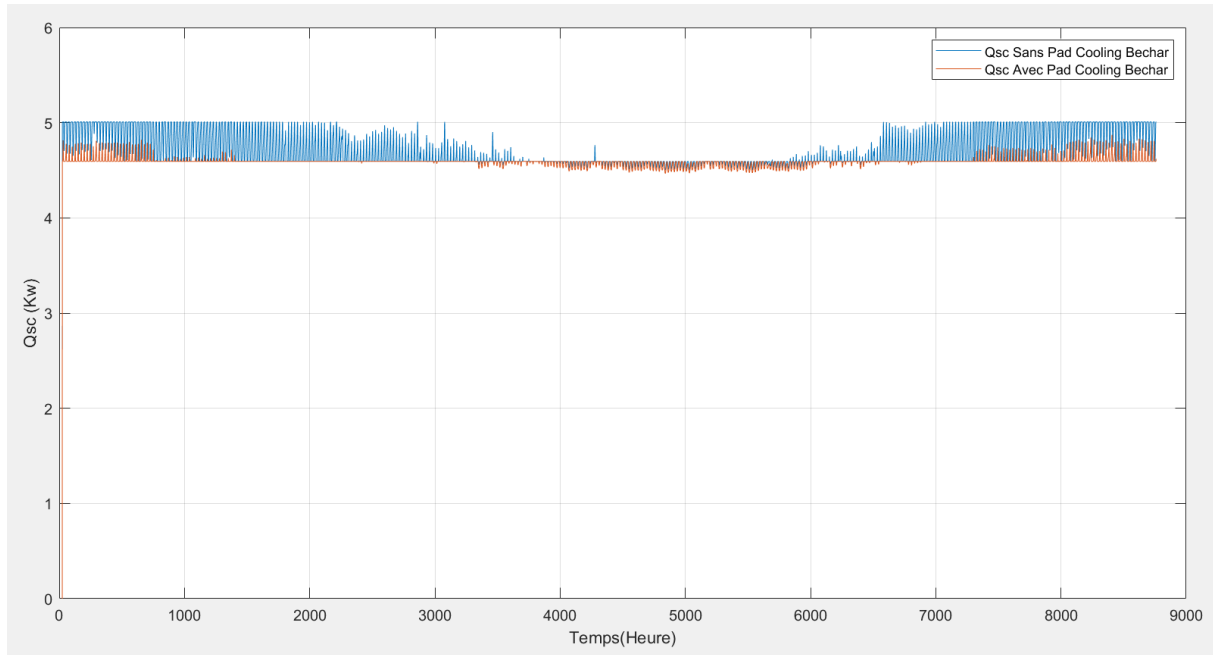


Figure 47: Graphe représente Q_{sc} rejeté par le condenseur à Béchar

À **Dar El Beïda**, bien que l'écart soit moins prononcé, une réduction est également observée. L'ajout du pad permet une baisse moyenne d'environ **0.194 kW**, ce qui représente une diminution de **4 à 5 %** (Voir figure 51). L'effet est plus limité en raison de l'humidité ambiante élevée, qui réduit l'efficacité du refroidissement adiabatique. Malgré cela, le système montre un comportement plus stable et une légère amélioration des performances, confirmant l'intérêt du pad même dans un climat humide.

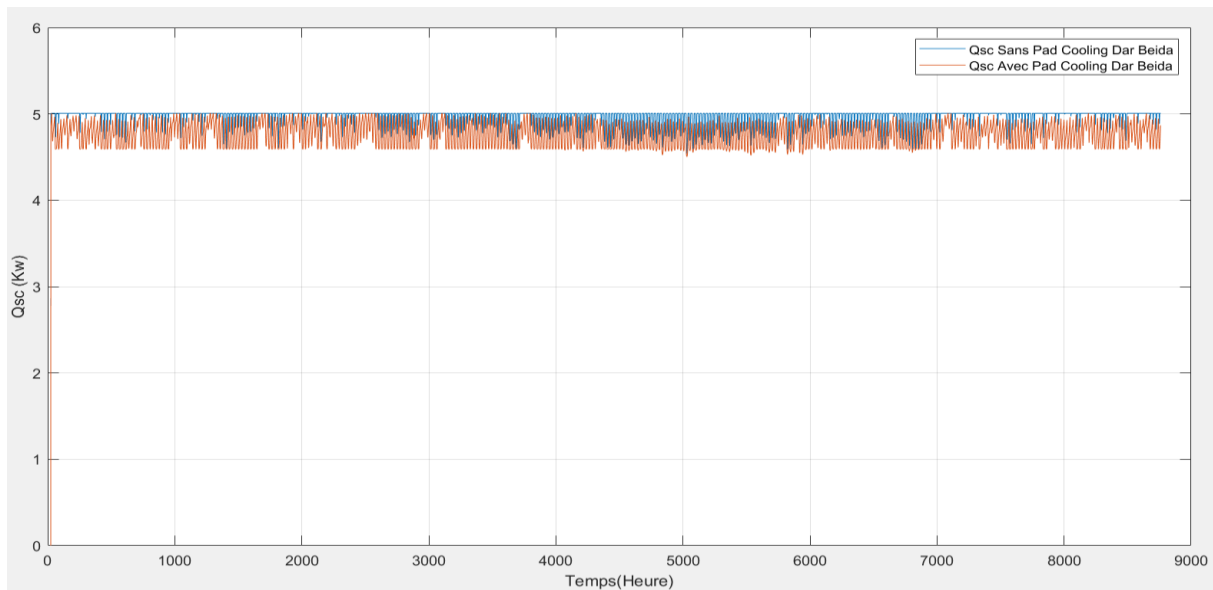


Figure 48: Graphe représente Q_{sc} rejeté par le condenseur à D. Beïda

En résumé, le refroidissement adiabatique par pad permet de **réduire significativement la chaleur à évacuer par le condenseur**, avec des gains thermiques plus marqués en climat sec (Béchar), mais restant positifs en climat humide (Dar El Beïda). Cette réduction contribue directement à soulager le compresseur, ce qui se répercute sur la consommation électrique et la durée de fonctionnement du système.

IV.2.1. Conclusion :

Ce travail s'est inscrit dans une démarche d'amélioration énergétique d'un système de climatisation à cycle de compression simple, en y intégrant un module de refroidissement adiabatique par tampon de refroidissement. L'objectif principal était d'évaluer, à travers une approche numérique, l'impact de cette technologie sur les performances thermiques et énergétiques d'un climatiseur split, dans deux contextes climatiques contrastés : Dar El Beïda (zone côtière humide) et Béchar (zone désertique sèche).

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel TRNSYS 2016, qui a permis de simuler deux scénarios : un fonctionnement classique sans tampon de refroidissement, et un second avec intégration d'un système adiabatique à l'entrée d'air du condenseur. Les résultats ont mis en évidence des améliorations notables avec l'ajout du tampon de refroidissement, notamment une baisse significative de la température de l'air en amont du condenseur (jusqu'à 7,6 °C à Béchar), une augmentation de l'humidité relative, une réduction de la chaleur rejetée, ainsi qu'une diminution de la consommation énergétique horaire pouvant atteindre 20 %.

Ces gains sont particulièrement marqués dans le climat sec de Béchar, où l'air ambiant, peu chargé en humidité, permet un fonctionnement optimal du système adiabatique. À Dar El Beïda, bien que les résultats restent positifs, l'humidité plus élevée limite le potentiel d'évaporation et donc l'efficacité du refroidissement.

IV.3. Partie expérimentale

Dans la présente section sont exposés les résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude du refroidissement adiabatique appliqué au condenseur d'un système de climatisation split. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer précisément l'impact de ce procédé sur les performances thermodynamiques du condenseur, en mettant l'accent sur la diminution effective de la température de l'air ambiant autour du condenseur, ainsi que sur l'amélioration de l'efficacité énergétique globale du système de climatisation. Les essais ont été réalisés dans des conditions contrôlées, avec un climatiseur réglé sur une température de consigne de 17 °C, une température ambiante initiale à l'intérieur de la maison solaire maintenue à 30 °C $\pm$ 1 °C, et une température ambiante extérieure de 30 °C $\pm$ 1 °C. Les paramètres clés tels que la température et la puissance frigorifique ont été mesurés. Cette présentation détaillée des résultats permettra de quantifier les gains apportés par le refroidissement adiabatique et de fournir une base solide pour la discussion et l'analyse qui suivront.

IV.3.1. Comparaison des conditions climatiques extérieures sur deux journées consécutives

La figure ci-dessus présente deux séries de mesures réalisées sur le système de climatisation, respectivement sans tampon de refroidissement adiabatique (mode 1) et avec tampon de refroidissement adiabatique (mode 2), lors de deux journées distinctes. Ces journées ont été soigneusement sélectionnées afin de garantir des conditions environnementales aussi similaires que possible. La figure illustre l'évolution de la température ambiante (courbe rouge) et de l'humidité relative (courbe noire) mesurées à l'extérieur de la maison solaire les 2 et 3 juin 2025. Pour ces deux jours, la température ambiante reste relativement stable, oscillant autour de 30 °C, avec de légères variations témoignant d'une constance des conditions climatiques extérieures durant la période d'enregistrement. De même, l'humidité relative se maintient dans une plage comparable, généralement comprise entre 65% et 70 %, avec des fluctuations modérées d'un jour à l'autre. La proximité des valeurs de température et d'humidité sur ces deux journées confirme que les conditions extérieures étaient quasi identiques, assurant ainsi la comparabilité et la fiabilité des résultats expérimentaux obtenus lors des essais de refroidissement adiabatique. Cette stabilité des paramètres environnementaux constitue un atout majeur pour l'analyse, car elle minimise l'impact des variations climatiques sur les performances du système étudié.

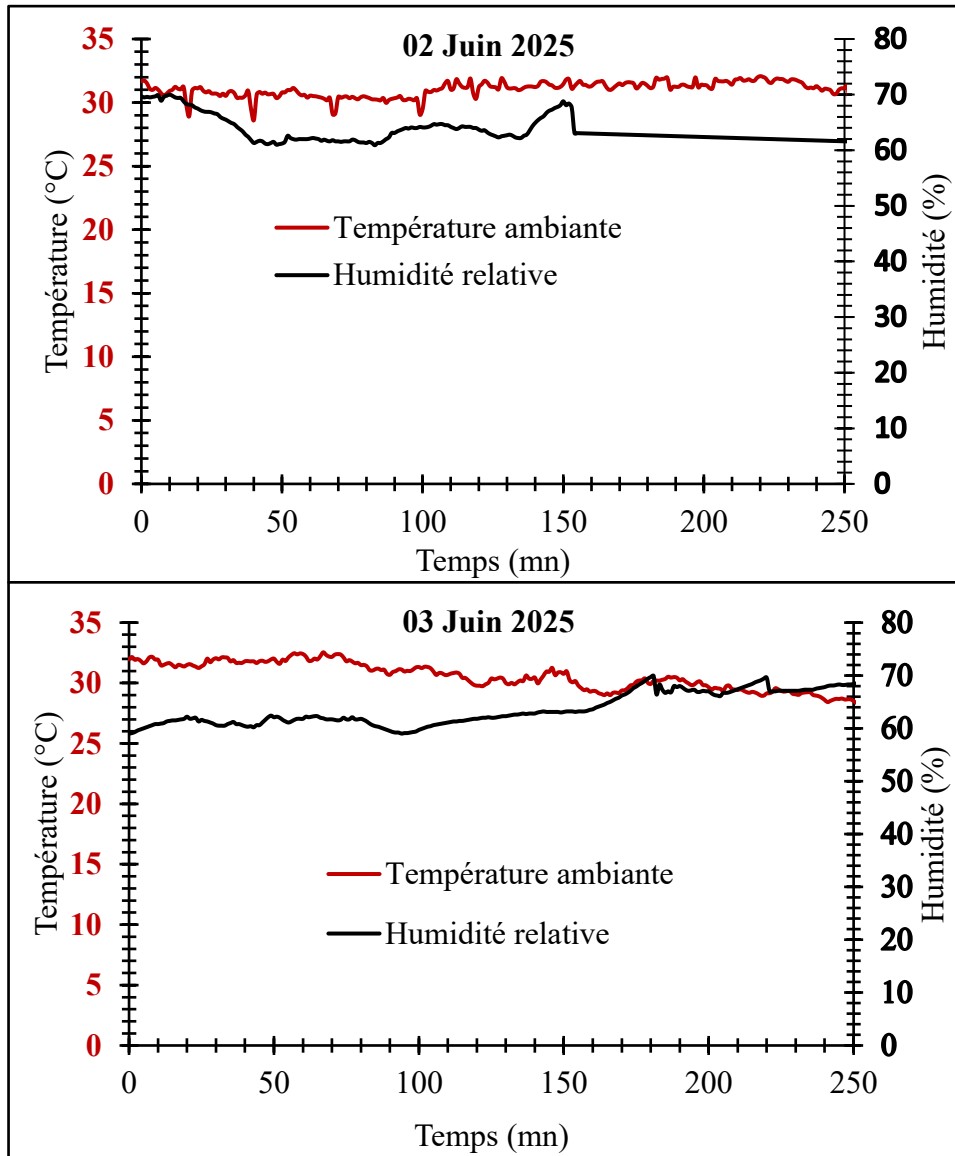


Figure 49: Évolution de la température ambiante et de l'humidité relative à l'extérieur de la maison solaire les 2 et 3 juin 2025

IV.3.2. Évolution de la température et de l'humidité de l'air sous différents modes de fonctionnement

La figure 53 compare l'évolution de la température (°C) et de l'humidité relative (%) de l'air dans l'unité de condenseur en fonction du temps (minutes), pour deux modes de fonctionnement :

- Mode 1 : Sans refroidissement adiabatique (Voir figure 53)

La température de l'air à l'entrée (courbe jaune) reste stable autour de 30 °C tout au long de l'expérience, tandis qu'à la sortie (courbe marron), elle atteint environ 37 °C. L'humidité relative à l'entrée (courbe bleu clair) oscille autour de 65 %, alors qu'à la sortie (courbe bleu

foncé), elle diminue légèrement pour se situer autour de 55 %. Cela indique que l'air subit un simple réchauffement sensible à travers le condenseur, avec une légère diminution de l'humidité relative.

- Mode 2 : Avec refroidissement adiabatique (Voir figure 53)

La température de l'air à l'entrée (courbe jaune) reste également proche de 30 °C. Après la section de pré-refroidissement (courbe verte, température intermédiaire située entre l'entrée du condenseur et le tampon de refroidissement), où commence le mouillage du tampon de refroidissement, la température chute à environ 23 °C, ce qui correspond à l'effet du refroidissement adiabatique. Ensuite, la température remonte à 33–34 °C à la sortie (courbe marron). L'humidité relative à l'entrée (courbe bleu clair) est d'environ 60 %, mais elle atteint un pic supérieur à 90 % au point intermédiaire (courbe bleu foncé), avant de redescendre à environ 55–60 % à la sortie.

Ces résultats illustrent clairement l'efficacité du refroidissement adiabatique : il permet de réduire la température de l'air de près de 7 °C au point intermédiaire, tout en augmentant fortement l'humidité relative (jusqu'à plus de 90 %). Cela améliore significativement les conditions d'entrée de l'air dans le condenseur et optimise ainsi le fonctionnement du système

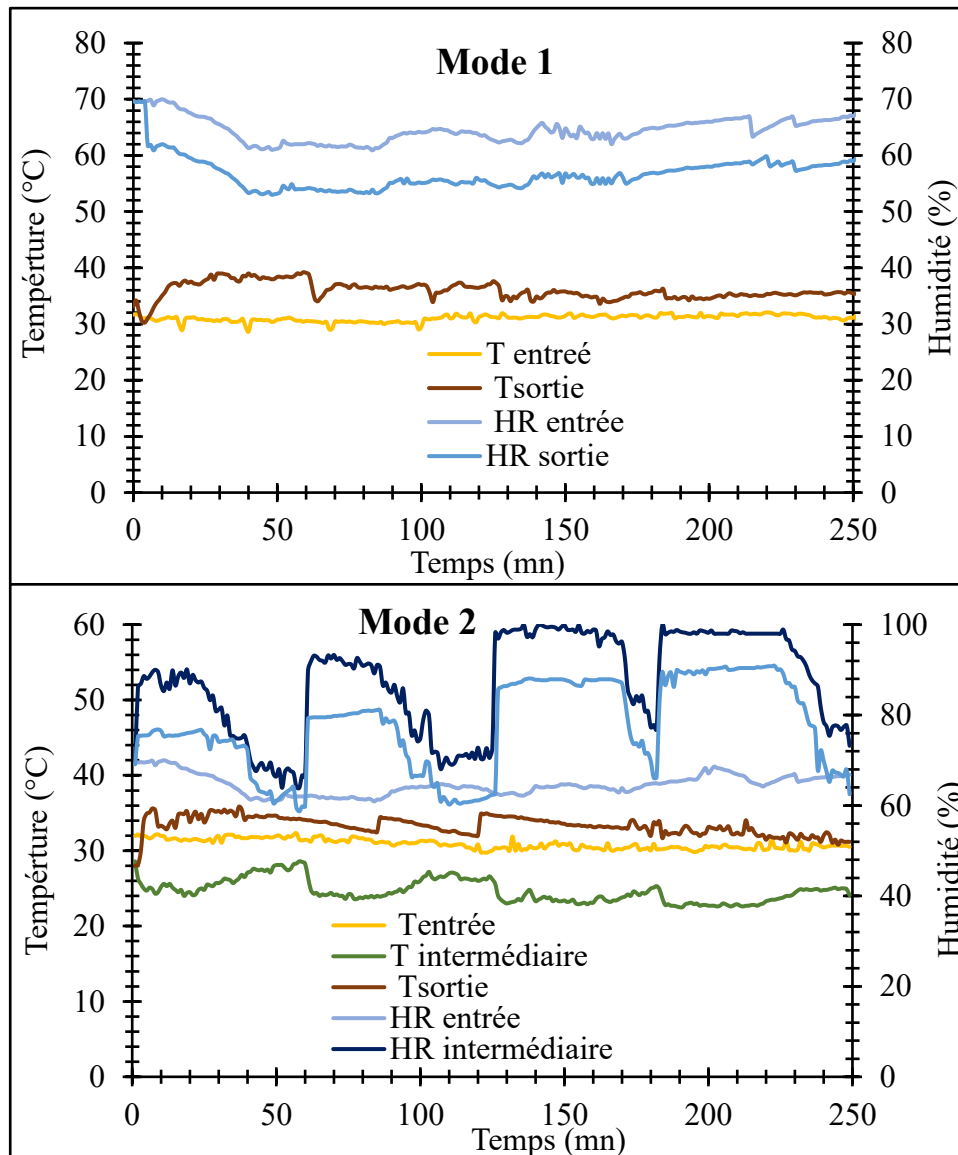


Figure 50: Évolution temporelle de la température et de l'humidité relative selon mode 1 et 2.

Le tableau 9 détaille la consommation d'eau d'un tampon évaporatif sur une période de quatre heures, de 12h30 à 16h30. Plusieurs observations peuvent être faites à partir de cette analyse :

- **Consommation initiale plus élevée :** (

La première heure (12h30 à 13h30) enregistre une consommation de 5 litres, supérieure à celle des heures suivantes. Cela suggère que le tampon évaporatif était initialement sec ou moins saturé et a nécessité un apport d'eau plus important pour atteindre son niveau d'humidification optimal, assurant ainsi une température de tampon variant entre 23 et 25 °C.

- **Stabilisation de la consommation :**

Après cette première heure, la consommation se stabilise à environ 3 litres par heure pour les trois heures suivantes. Il est à noter que lorsque la température du tampon évaporatif approche 28 °C, le mouillage commence. Cette stabilisation indique que le tampon a atteint un état de fonctionnement stable, où l'évaporation de l'eau s'effectue à un rythme constant, en adéquation avec la demande continue de refroidissement ou des conditions environnementales stables.

Tableau 9: Consommation d'eau du tampon évaporatif selon les intervalles horaires

Temps	Consommation d'eau
12 : 30 h à 13 : 30	5 L
13 : 30 h à 14 : 30	3 L
14: 30 à 15 : 30	3 L
15 : 30 à 16 : 30	3 L
TOTAL	14 L

IV.3.3. Cycle ON/OFF d'un climatiseur split : Analyse thermique

La figure 54 illustre l'évolution de la température de l'évaporateur (T_{evap}) en fonction du temps lors du fonctionnement dans un système de climatisation. On distingue deux phases principales. La première, appelée "phase de démarrage du compresseur", s'étend de 0 à environ 65 minutes. Durant cette phase, la température chute rapidement de près de 30°C à environ 5°C, traduisant la mise en route du compresseur et l'abaissement rapide de la température dans l'évaporateur. Après cette phase initiale, le système entre dans une zone de fonctionnement stable caractérisée par des cycles ON/OFF réguliers du compresseur.

On observe alors une oscillation périodique de la température entre environ 4°C et 19°C, correspondant à l'arrêt et au redémarrage successifs du compresseur pour maintenir la température cible. Ce comportement cyclique est typique des systèmes frigorifiques à régulation tout ou rien, où le compresseur s'active dès que la température dépasse un seuil supérieur et s'arrête lorsqu'elle atteint un seuil inférieur. L'analyse de cette courbe permet donc de visualiser à la fois la rapidité de la descente en température lors du démarrage et la

stabilité du régime cyclique, deux indicateurs importants de la performance et de l'efficacité du système.

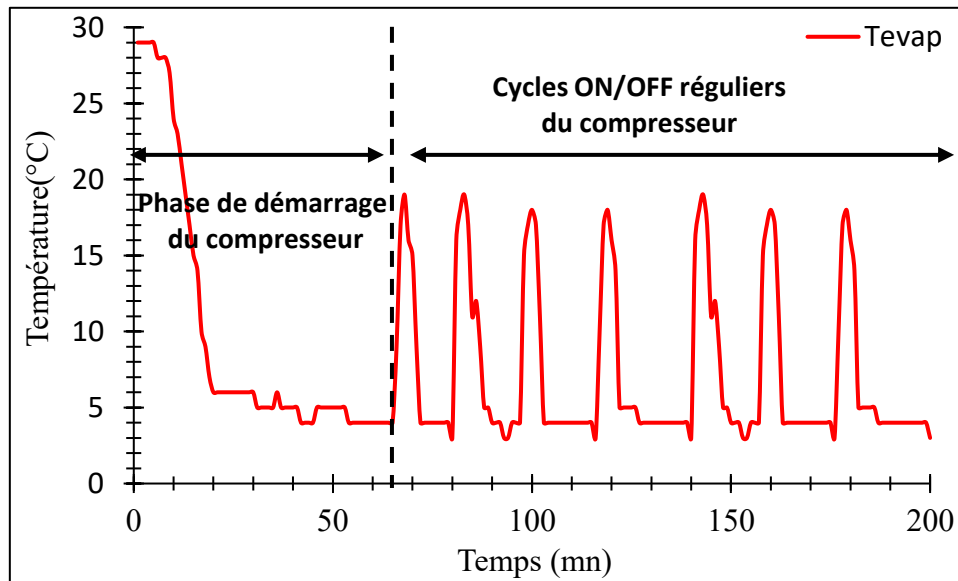


Figure 51: Variation de la température de l'évaporateur (T_{evap}) en fonction du temps avec indication des phases de démarrage et des cycles ON/OFF du compresseur

La figure ci-dessus montre l'évolution de la température d'évaporateur (T_{evap}) en fonction du temps dans le système de climatisation de la maison solaire. On distingue clairement deux phases de fonctionnement : $t=\text{ON}$, lorsque le compresseur est en marche, et $t=\text{OFF}$, lorsqu'il est arrêté. Au début, la température reste stable autour de 4 $^{\circ}\text{C}$, traduisant un état d'équilibre thermique dans l'évaporateur. Vers 11 minutes, le passage en phase $t=\text{ON}$ s'accompagne d'une augmentation très rapide de T_{evap} , qui atteint un pic proche de 19 $^{\circ}\text{C}$. Cette élévation brutale est principalement due à une différence dans l'atmosphère interne de la maison solaire, notamment à une augmentation soudaine de la charge thermique à l'intérieur. Après ce maximum, la température diminue progressivement, reflétant l'absorption efficace de la chaleur par l'évaporateur et le retour progressif à l'équilibre.

Lorsque le compresseur s'arrête ($t=\text{OFF}$, vers 29 minutes), on observe une nouvelle hausse rapide de la température, suivie d'une baisse, illustrant le caractère cyclique du fonctionnement du système. Ce comportement oscillatoire est typique des régulations tout ou rien : l'inertie thermique du système et le temps de réponse du compresseur provoquent des fluctuations de température entre les phases ON et OFF.

Cette dynamique met en lumière l'importance d'un contrôle précis du système pour limiter les variations de température, optimiser la performance énergétique et garantir un fonctionnement stable de la climatisation. Ainsi, la figure souligne la nécessité d'une régulation adaptée afin d'assurer un confort thermique optimal et une efficacité énergétique accrue dans les systèmes de climatisation.

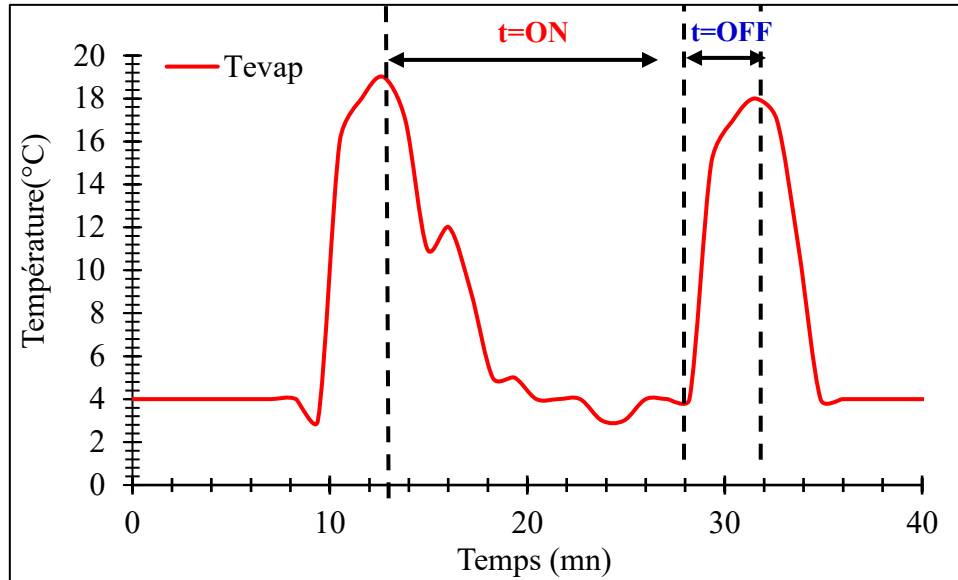


Figure 52: Profil temporel de T_{evap} selon les phases ON/OFF du compresseur dans le système de climatisation

IV.3.4. Effet du tampon adiabatique sur la température de l'évaporateur

La figure ci-dessus illustre l'évolution de la température de l'évaporateur (T_{evap}) d'un climatiseur split en fonction du temps, sur une période de 250 minutes, en comparant deux scénarios : le fonctionnement sans tampon adiabatique (Mode 1, courbe rouge) et avec tampon adiabatique (Mode 2, courbe bleue). Au démarrage, la température de l'évaporateur atteint environ 29 °C sans tampon et 28 °C avec tampon, puis chute rapidement lors de la mise en marche du compresseur, atteignant respectivement 5 °C et 2 °C. Par la suite, le système adopte un fonctionnement cyclique ON/OFF typique des climatiseurs split : la température remonte progressivement lors de la phase OFF (arrêt du compresseur) et redescend brutalement lors de la phase ON (redémarrage du compresseur). Conséquences sur la température de l'évaporateur :

- **Sans tampon adiabatique (Mode 1, courbe rouge)** (Voir figure 56)

Lorsque l'air extérieur est chaud, le condenseur peine à rejeter la chaleur absorbée. Cela entraîne une augmentation de la pression de condensation et une élévation de la température de

condensation, ce qui réduit la capacité de refroidissement du système. L'évaporateur reçoit alors un fluide frigorigène moins froid, ce qui provoque une remontée de sa température maximale lors des cycles OFF, atteignant jusqu'à 20 °C.

- **Avec tampon adiabatique (Mode 2, courbe bleue)** (Voir figure 56)

Le condenseur est alimenté par un air pré-refroidi grâce au tampon adiabatique, qui abaisse la température de l'air ambiant par évaporation. Cette amélioration du refroidissement du condenseur diminue la pression de condensation : le fluide frigorigène arrive alors plus froid à l'évaporateur, qui peut ainsi maintenir une température plus basse, même lors des phases OFF. La température maximale de l'évaporateur ne dépasse alors pas 14 °C.

- **Analyse comparative et bénéfices du tampon adiabatique** (Voir figure 56)

L'analyse de la figure met en évidence l'évolution cyclique de la température, reflétant les phases de marche et d'arrêt du compresseur pour les deux modes de fonctionnement étudiés.

- **Sans tampon adiabatique (Mode 1, courbe rouge)** : On observe que le temps de marche du compresseur (correspondant à la chute rapide de température) est généralement plus long que le temps d'arrêt (phase de remontée de la température). Typiquement, chaque cycle présente un temps de marche d'environ 10 minutes, suivi d'un temps d'arrêt d'environ 15 minutes. Le rapport temps d'arrêt/temps de marche s'établit donc autour de 1,5 indiquant que le compresseur fonctionne plus fréquemment pour maintenir la température souhaitée.

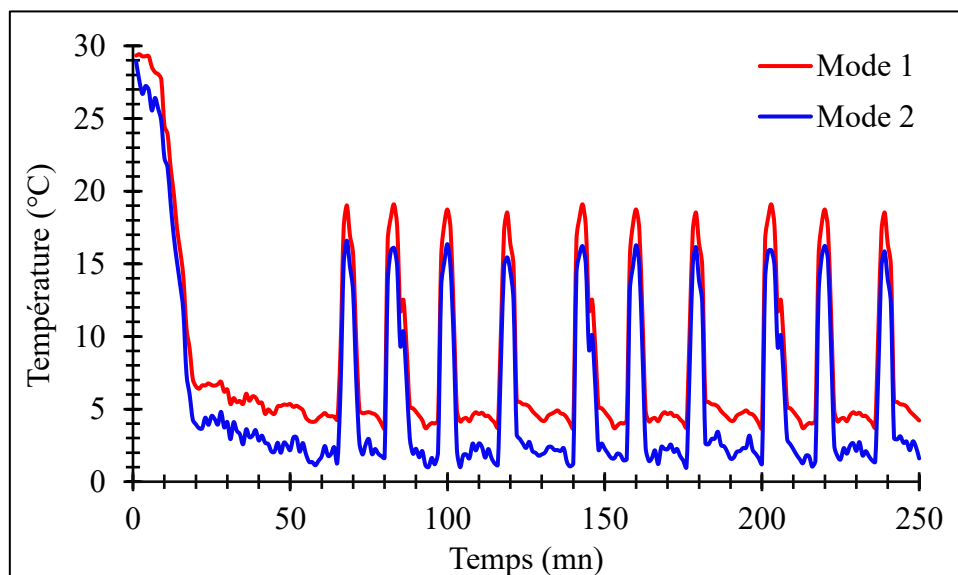


Figure 53: Évolution cyclique de la température de l'évaporateur avec et sans tampon adiabatique.

- **Avec tampon adiabatique (Mode 2, courbe bleue) :** L'ajout du tampon adiabatique se traduit par un allongement significatif du temps d'arrêt du compresseur. Dans ce mode, le temps de marche est réduit à environ 8 minutes, tandis que le temps d'arrêt atteint environ 22 minutes. Le rapport temps d'arrêt/temps de marche s'élève alors à près de 2,75, ce qui témoigne d'une amélioration notable de l'efficacité du système : le compresseur reste à l'arrêt plus longtemps entre deux cycles, réduisant ainsi la consommation énergétique globale.

IV.3.5. Consommation électrique en modes sans et avec refroidissement adiabatique :

La figure 57 compare la consommation électrique d'un système de climatisation sur une période de quatre heures pour deux modes de fonctionnement : sans tampon de refroidissement adiabatique (mode 1) et avec tampon de refroidissement adiabatique (mode 2). On observe que le mode 1 présente une consommation de 4 kWh, tandis que le mode 2 affiche une consommation réduite à 3,33 kWh. Cette diminution de près de 17 % en mode 2 met en évidence l'efficacité énergétique apportée par l'utilisation du tampon de refroidissement adiabatique, qui permet de limiter la demande électrique du système.

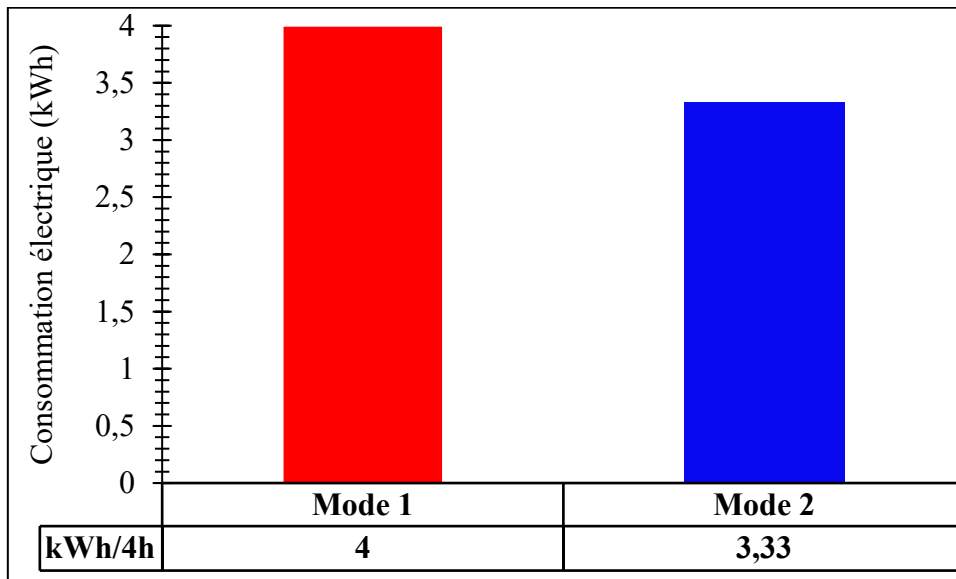


Figure 54: Consommation électrique du climatiseur avec et sans tampon adiabatique.

IV.3.6. Analyse de l'optimisation de la consommation pour les modes 1 et 2

Le champ photovoltaïque de la maison solaire de l'UDES à Bou Ismaïl est constitué de 16 modules de 200 Wc chacun, offrant une puissance totale installée de 3,2 kWc et une production

annuelle estimée à environ 5 440 kWh, sur la base d'un rendement régional de 1 700 kWh/kWc/an pour Tipaza. Le stockage de l'énergie est assuré par des batteries plomb-acide d'une capacité de 4 kWh [29].

La figure 58 illustre l'évolution de l'énergie cumulée (en kWh) en fonction du temps (en heures) sur une période de 12 heures, correspondant à l'analyse de la consommation sur une journée (3 cycles de 4 h), pour trois scénarios :

- Mode 1 (courbe rouge, carrés) : consommation énergétique quotidienne du système de climatisation sans tampon de refroidissement adiabatique, atteignant 12 kWh/jour.
- Mode 2 (courbe bleue, losanges) : consommation énergétique quotidienne avec tampon adiabatique, réduite à 9,99 kWh/jour.
- Production PV (courbe noire, cercles) : énergie produite par les panneaux photovoltaïques, totalisant 14,9 kWh/jour.

Une ligne horizontale en pointillés verts représente la capacité de stockage du système, fixée à 4 kWh.

L'analyse des courbes montre que la production photovoltaïque (courbe noire) reste constamment supérieure à la consommation, aussi bien en mode 1 qu'en mode 2, ce qui garantit l'autonomie énergétique du système à condition d'optimiser la gestion du stockage. La courbe rouge (mode 1) indique une consommation plus élevée que la courbe bleue (mode 2), mettant en évidence l'efficacité du tampon adiabatique qui permet de réduire la demande énergétique d'environ 17 %.

La capacité de stockage de 4 kWh est atteinte très rapidement, dès les 3 à 4 premières heures de la journée solaire. Toute production supplémentaire au-delà de cette capacité ne peut pas être stockée et doit donc être consommée en temps réel ou perdue.

L'écart entre les deux modes de fonctionnement souligne l'intérêt du tampon adiabatique : il permet non seulement de diminuer la consommation électrique, mais aussi de mieux valoriser la production solaire et de limiter la sollicitation du stockage. Ainsi, le système gagne en efficacité et s'adapte mieux à une alimentation photovoltaïque autonome

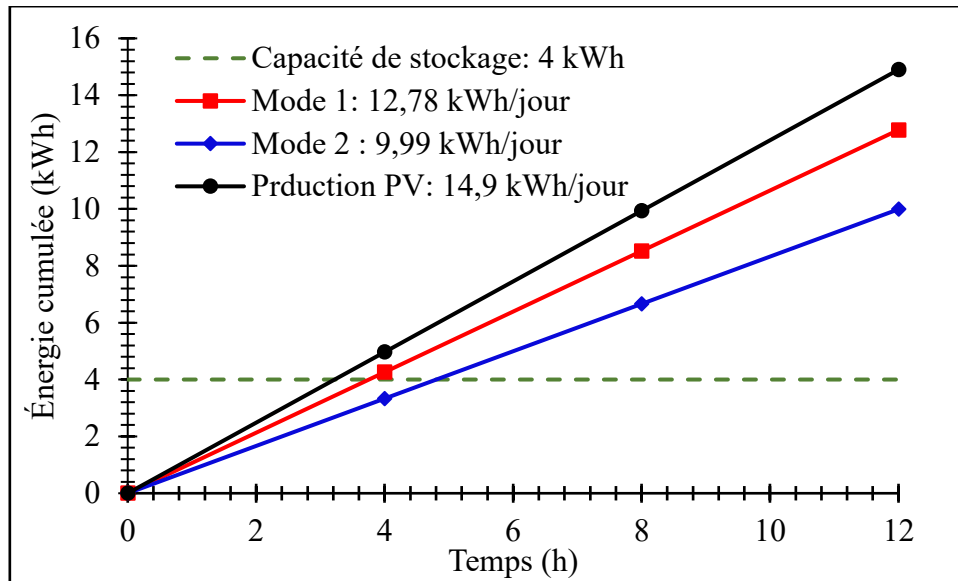


Figure 55: Optimisation de la consommation énergétique dans la Maison Solaire UDES : comparaison des modes de fonctionnement

IV.3.7. Conclusion

Cette étude met en évidence que le système de climatisation hybride intégrant un refroidissement adiabatique par tampon de refroidissement présente un fort potentiel d'optimisation énergétique, en particulier dans les climats chauds et secs comme celui de Béchar, où la température à l'entrée du condenseur peut être réduite jusqu'à 7,6 °C, contre seulement 3,6 °C dans des climats plus humides tels que Dar El Beïda. Cette différence s'explique par un potentiel d'évaporation plus important dans les environnements à faible humidité relative, rendant l'efficacité du système inversement proportionnelle au taux d'humidité ambiant. Sur le plan énergétique, l'intégration du refroidissement adiabatique permet une réduction significative de la consommation électrique du compresseur, pouvant atteindre 20 %, ainsi qu'une diminution de la chaleur rejetée par le condenseur, jusqu'à 8,5 % à Béchar. Les essais expérimentaux confirment ces bénéfices, avec une baisse notable de la température d'entrée du condenseur, une amélioration des performances thermiques, une meilleure stabilité des cycles de fonctionnement, ainsi qu'une économie d'énergie mesurable d'environ 17 % sur une période de quatre heures. Enfin, cette technologie s'avère compatible avec un environnement résidentiel solaire, validant son efficacité comme solution durable pour améliorer le confort thermique tout en réduisant la consommation énergétique et l'impact environnemental des systèmes de climatisation.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons étudié la possibilité d'améliorer les performances d'un climatiseur à cycle de compression simple en intégrant un système de refroidissement adiabatique. Cette approche vise à réduire la température de l'air à l'entrée du condenseur, afin d'alléger la charge thermique sur le compresseur et d'augmenter l'efficacité globale du système, particulièrement dans des conditions climatiques extrêmes comme celles de Béchar.

La méthodologie adoptée a reposé sur une double approche : une simulation numérique via le logiciel TRNSYS 2016 et une expérimentation dans un environnement réel. Deux scénarios ont été comparés : fonctionnement classique du climatiseur seul, et fonctionnement avec ajout du système adiabatique. Les résultats ont montré une nette amélioration des performances dans le second scénario, notamment une baisse de la consommation énergétique et une meilleure stabilité thermique.

L'analyse des résultats a également permis de mettre en évidence l'influence du climat sur l'efficacité du refroidissement adiabatique. En zone sèche (Béchar), les gains en efficacité sont plus significatifs qu'en zone humide (Dar El Beïda). Cela confirme l'intérêt d'adapter les solutions de climatisation aux caractéristiques locales.

Dans le contexte spécifique de la maison solaire de l'UDES, équipée d'un système photovoltaïque de 3,2 kWc et d'un stockage sur batteries de 4 kWh, l'optimisation apportée par le refroidissement adiabatique présente un intérêt supplémentaire. En effet, la réduction de la consommation énergétique permet une meilleure adéquation avec la capacité de stockage disponible et génère un surplus énergétique plus important, utilisable pour d'autres besoins ou pour compenser les périodes de faible ensoleillement.

Néanmoins, cette étude présente certaines limites qu'il convient de souligner. La consommation d'eau du système adiabatique, bien que modérée (environ 14 litres sur quatre heures), constitue un paramètre important à prendre en compte, notamment dans les régions où cette ressource varie considérablement d'une zone à l'autre. De plus, l'efficacité variable selon les conditions climatiques souligne la nécessité d'une approche adaptative dans la conception et le dimensionnement de tels systèmes.

En perspective, plusieurs axes de recherche et d'amélioration se dessinent. L'optimisation des matériaux constitutifs du tampon de refroidissement, notamment à travers l'utilisation de médias plus performants ou de géométries innovantes, pourrait accroître l'efficacité du refroidissement tout en réduisant la consommation d'eau.

L'automatisation du contrôle de l'humidification en fonction des conditions ambiantes permettrait également d'adapter en temps réel le fonctionnement du système aux variations climatiques. Enfin, l'intégration de cette technologie dans des systèmes plus complexes, comme les pompes à chaleur réversibles ou les installations de climatisation centralisées, ouvre des perspectives prometteuses pour l'amélioration globale de l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment.

En définitive, cette recherche démontre que le refroidissement adiabatique par tampon de refroidissement, constitue une solution techniquement viable, économiquement avantageuse et écologiquement pertinente pour l'optimisation des systèmes de climatisation en climat chaud, particulièrement dans les régions arides comme le sud algérien. Son déploiement à plus grande échelle pourrait contribuer significativement à la réduction de la consommation énergétique liée au conditionnement d'air, enjeu majeur dans le contexte actuel de transition énergétique et de lutte contre le réchauffement climatique.

Bibliographie :

- [1]- Zaroual, A., & Sisban, A. (2023, 25 juin). *Analyse dynamique et thermique sur le mouvement de l'air à l'intérieur d'une chambre* [Mémoire de Master]. Université Mostaganim
- [2]- Europe Énergie. (s.d.). *Fonctionnement d'un climatiseur split : principes et composants essentiels*. Consulté en 2025 sur <https://www.europe-energie.com>
- [3]- Valeo Tech Academy. (s.d.). *Le compresseur frigorifique : fonctionnement, types et rôle dans le cycle de réfrigération*. Consulté en 2025 sur <https://www.valeo-tech-academy.com>
- [4]- Kerui. (s.d.). *Le condenseur : principe de fonctionnement et rôle dans le cycle de froid*. Consulté en 2025 sur <https://www.kerui.com>
- [5]- ABC Clim. (s.d.). *Le détendeur frigorifique : rôle, types et fonctionnement*. Consulté en 2025 sur <https://www.abc-clim.com>
- [6]-Lipon, G. (2023, 28 avril). *L'évaporateur : fonctionnement, types et importance dans un système de climatisation*. Aubade. Consulté en 2025 sur <https://www.aubade.fr>
- [7]-Europe Énergie. (s.d.). *Fonctionnement d'un climatiseur split : principes et composants essentiels*. Consulté en 2025 sur <https://www.europe-energie.com>
- [8]-EF4. (s.d.). *Cycle frigorifique : principe de fonctionnement et applications en climatisation*. Consulté en 2025 sur <https://www.ef4>.
- [9]-Europe Énergie. (s.d.). *Fonctionnement d'un climatiseur split : principes et composants essentiels*. Consulté en 2025 sur <https://www.europe-energie.com>
- [10]-Techno-science.net. (s.d.). *Cycle de Carnot : fonctionnement, rendement et importance en thermodynamique*. Consulté en 2025 sur <https://www.techno-science.net>
- [11]-Clim Alizé. (s.d.). *Climatiseur réversible : principe, avantages et fonctionnement*. Consulté en 2025 sur <https://www.clim-alize.com>
- [12]-XP Air. (s.d.). *Fonctionnement et avantages d'un climatiseur central dans les environnements résidentiels*. Consulté en 2025 sur <https://www.xpair.com>
- [13]-XP Air. (s.d.). *Fonctionnement et avantages d'un climatiseur split dans les environnements résidentiels*. Consulté en 2025 sur <https://www.xpair.com>
- [14] -Ferlay, N. (2009, 10 juin). *Le cycle de Carnot : fondements thermodynamiques et rendement maximal*. Numephy. Consulté en 2025 sur <https://www.numephy.fr>
- [15]-F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer-6th Edition", John Wiley, New York, 2006.
- [16]- <https://www.guidibatimentdurable.brussels/refroidissement-adiabatique>

- [17]-<https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/production-defroid/refroidissement-adiabatique/>
- [18] - Sohani, A., Zabihigivi, M., Moradi, M. H., Sayyaadi, H., & Balyani, H. H. (2017). A comprehensive performance investigation of cellulose evaporative cooling pads: Experimental study and artificial intelligence modeling. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1664–1680. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.162>
- [19]- Rampazzo, M., Lionello, M., Beghi, A., Sisti, E., & Cecchinato, L. (2019). A static moving boundary modelling approach for simulation of indirect evaporative free cooling systems. *Applied Energy*, 250, 1719-1728. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.087>
- [20]- <https://www.eurovent-certification.com/fr/category/article/evaporative-cooling?universe=comfort>
- [21] - Martínez, P., Lucas, M., Aguilar, F. J., Ruiz, J., & Quiles, P. V. (2024). Experimental study of an on-grid hybrid solar air conditioner with evaporative pre-cooling of condenser inlet air. *Applied Thermal Engineering*, 248, 123335. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123335>
- [22]- Abdelrahman, M.A., & Sherif, M.A. (2021). *Comparative study on the cooling performance of evaporative cooling systems using seawater and freshwater*. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100963. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100963>
- [23]- Fayazbakhsh, S.A., Bahrami, M., & Djilali, N. (2020). Aerodynamic analysis and CFD simulation of several cellulose evaporative cooling pads. *Applied Thermal Engineering*, 169, 114993. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114993>
- [24]- Silalli, B., & Bouacha, N. (2019). *Étude et réalisation d'une installation frigorifique multi-étagée* [Mémoire de fin d'études, Université de Blida].
- [25]- EnergyPlus. (2014, 30 janvier). *Le refroidissement adiabatique : fonctionnement et intégration dans les systèmes de CVC*. Consulté en 2025 sur <https://www.energyplus.net>
- [26]- Les humidificateurs. (s. d.). *Viefim*. Récupéré le 25 mai 2025 de <https://www.viefim.fr/humidificateurs>
- [27]- Europe Énergie. (s.d.). *Fonctionnement d'un climatiseur split : principes et composants essentiels*. Consulté en 2025 sur <https://www.europe-energie.com>
- [28] - SEL. (2022). TRNSYS 18 – A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA

- [29]- Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES), Rapport technique sur la maison solaire de Bou Ismaïl, Algérie, 2020.
- [30]- Mémoire de Master, *Simulation d'une machine frigorifique à absorption sous TRNSYS*, Université de Blida, 2020
- [31]- Energie Plus, *Évaluer l'efficacité de la production frigorifique associée*, 2020
- [32]- Mémoire de Master, , *Étude d'un cycle de réfrigération tritherme à absorption*, Université d'Ouargla, 2019