

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 20 août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département Physique

N° :

Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Thème

Analyse comparative des performances énergétiques d'une machine frigorifique solaire à adsorption et d'une machine frigorifique à compression pour la climatisation dans un climat méditerranéen

Réalisé par LAIFAOUI Malek

Soutenu le :01/07/2025 devant le jury composé de :

F. Mebarek Oudina	Prof.	Université de Skikda	Président
K. Bourrich	M.A.A	Université de Skikda	Rapporteur
N. Boulaktout	M.A.A	Université de Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est particulièrement agréable de pouvoir exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire et à mon parcours académique.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à **Madame BOURRICHE Kaouther** enseignante-chercheuse pour avoir accepté de diriger ce travail. Je lui suis infiniment reconnaissante pour sa disponibilité, sa rigueur, la qualité de ses conseils, et son accompagnement constant. Son expertise, sa patience et son sens du détail ont été essentiels à l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury, qui me font l'honneur d'évaluer ce travail. Je suis très reconnaissante pour l'intérêt qu'ils portent à mon sujet, ainsi que pour leurs remarques constructives et leur bienveillance.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants et enseignants-chercheurs du département physique, pour la qualité des enseignements dispensés durant ces années de formation. Leurs compétences, leur exigence académique et leur disponibilité ont grandement enrichi mes connaissances et forgé ma réflexion.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à tous mes collègues, camarades de promotion et amis. Leurs encouragements, nos échanges enrichissants, nos moments de partage et d'entraide ont été d'un soutien précieux tant sur le plan scientifique que personnel.

Enfin, je remercie du fond du cœur ma famille. À mes parents, véritables piliers de ma vie, qui n'ont jamais cessé de croire en moi, de me soutenir et de m'encourager, même dans les moments les plus exigeants. Leur amour, leurs sacrifices et leur confiance ont été la clé de ma persévérance et de ma réussite. À mes frères et sœurs, pour leur soutien indéfectible, leurs mots réconfortants et leur présence constante qui ont souvent été pour moi une véritable source de motivation.

Dédicaces

Je dédie ce travail avec une profonde émotion et une sincère gratitude :

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience, leurs sacrifices et leur soutien permanent. Rien de ce que j'ai entrepris n'aurait été possible sans leur présence bienveillante et leur foi en moi.

À mes grands-parents, pour leurs prières, leurs encouragements silencieux et leur sagesse transmise, qui m'ont guidé(e) tout au long de mon parcours.

À mes sœurs, Samar et Farah, et **à mes frères**, Abdel-Salam et Abdel-Moumen, pour leur affection, leur motivation constante et les moments de joie et de réconfort partagés.

À tous mes enseignants, qui, à travers leur passion et leur engagement, ont su éveiller en moi la curiosité, la rigueur et l'envie d'apprendre

Et plus largement, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, par un mot, un conseil, une écoute ou un encouragement.

المخلص

يقدم هذا البحث دراسة مقارنة بين تقنيتين للتبريد: آلة التبريد الشمسية بالامتزاز وآلة التبريد بالضغط الكهربائي. الهدف الرئيسي هو تقييم أدائهما الطاقوي والبيئي في مناخ البحر الأبيض المتوسط، مع اعتماد مدينة سكيكدة (الجزائر) كدراسة حالة.

تم تطوير نماذج ديناميكية حرارية لمحاكاة دورات تشغيل كل نظام باستخدام برنامج MATLAB ومكتبات الخصائص الترموفيزيائية مثل CoolProp. أظهرت النتائج أن آلة الامتزاز، رغم أن معامل أدائها (COP) أقل، إلا أنها تتميز باستقلاليته الطاقوية، وأثرها البيئي المنخفض، وقدرتها على العمل بالطاقة الشمسية. في المقابل، توفر آلة الضغط مردوداً طاقوياً أعلى، لكن على حساب استهلاك كهربائي مستمر واستخدام غازات تبريد ذات قدرة عالية على الاحتباس الحراري (PRG).

تُظهر المقارنة التقنية والبيئية أن تقنية الامتزاز مناسبة أكثر للمناطق الريفية أو ذات الوصول المحدود للشبكة الكهربائية، بينما تظل تقنية الضغط ملائمة للبيئات ذات الطلب العالي على التبريد. كما تُقترح آفاق بحثية لتطوير أنظمة هجينة وتحسين مواد الامتزاز.

Résumé

Ce mémoire présente une étude comparative entre deux technologies de climatisation : la machine frigorifique solaire à adsorption et la machine frigorifique à compression électrique. L'objectif principal est d'évaluer leurs performances énergétiques et environnementales dans un climat méditerranéen, en prenant comme cas d'étude la ville de Skikda (Algérie).

Des modèles thermodynamiques ont été développés pour simuler les cycles de fonctionnement de chaque système à l'aide de MATLAB et des bibliothèques thermophysiques telles que CoolProp. Les résultats montrent que la machine à adsorption, bien que présentant un coefficient de performance (COP) plus faible, se distingue par son autonomie énergétique, son faible impact environnemental et sa capacité à fonctionner avec l'énergie solaire. En revanche, la machine à compression offre un rendement énergétique plus élevé mais au prix d'une consommation électrique continue et d'un usage de fluides frigorigènes à fort potentiel de réchauffement global (PRG).

L'analyse comparative menée sur la base de critères techniques et écologiques permet de recommander la technologie à adsorption pour les zones rurales ou à faible accès au réseau, tandis que la compression reste adaptée aux environnements à forte demande frigorifique. Des perspectives de recherche sont également proposées, notamment le développement de systèmes hybrides et l'optimisation des matériaux adsorbants.

Abstract

This thesis presents a comparative study between two air conditioning technologies: the solar adsorption refrigeration machine and the electric vapor compression refrigeration machine. The main objective is to assess their energy and environmental performance under Mediterranean climate conditions, using the city of Skikda (Algeria) as a case study.

Thermodynamic models were developed to simulate the operating cycles of each system using MATLAB and thermophysical libraries such as CoolProp. The results show that although the adsorption system has a lower coefficient of performance (COP), it stands out due to its energy autonomy, low environmental impact, and ability to operate with solar energy. In contrast, the compression system offers higher energy efficiency, but at the cost of continuous electricity consumption and the use of high global warming potential (GWP) refrigerants.

The comparative analysis based on technical and ecological criteria suggests that adsorption technology is preferable in rural areas or where electricity access is limited, while compression remains suitable for environments with high cooling demand. Future research directions include hybrid system development and optimization of adsorbent materials.

Sommaire

1.1.1 Spécificités des besoins	14
1.2 Les machines frigorifiques solaires à adsorption: principes et fonctionnement	14
1.2.2 Intégration solaire	15
1.2.3 Matériaux utilisés	16
1.2.4 Avantages	16
1.2.5 Limitations	16
1.3 Les machines frigorifiques à compression: principes et fonctionnement	16
1.3.1 Principe de fonctionnement	17
1.3.2 Fluides frigorigènes	17
1.3.3 Avantages	17
1.3.4 Inconvénients	18
1.4 Comparaison des technologies en termes de performances énergétiques et d'impact environnemental	18
1.4.1 Synthèse	18
1.5 Défis et opportunités des deux technologies	18
1.5.1 Défis technologiques	18
1.5.2 Opportunités d'évolution	19
2.1 Bases thermodynamiques des cycles frigorifiques	21
2.1.1 Premier principe	21
2.1.2 Deuxième principe	21
2.2 Le cycle d'adsorption solaire: description et modélisation	21
2.2.1 Étapes du cycle	21
2.2.2 Modélisation	21
2.2.3 Hypothèses pour la modélisation	22
2.3 Le cycle de compression : description et modélisation	22
2.3.1 Schéma de base (cycle de Carnot réel simplifié)	22

2.3.2 Modélisation	22
2.4 Paramètres de performance clés: COP, efficacité énergétique, consommations spécifique	23
2.4.1 Coefficient de performance (COP)	23
2.4.2 Efficacité énergétique globale.....	23
2.4.3 Consommations spécifique d'énergie (CSE).....	23
2.4.4 Autres indicateurs utiles	23
2.5 Méthodologie de modélisation pour la comparaison.....	24
2.5.1 Étapes de la méthodologie.....	24
3.1 Description des conditions climatiques méditerranéennes utilisées pour l'analyse	27
3.2 Modèles utilisés pour simuler les performances des deux machines	27
3.2.1 Modèle de la machine à adsorption.....	27
3.2.2 Modèle de la machine à compression.....	27
3.3 Données d'entrée: ressources solaires, caractéristiques des systèmes, hypothèses de fonctionnement	28
3.4 Outils et logiciels de simulation utilisés	29
3.5 Critères d'évaluation des performances énergétiques	29
3.6 Conclusion.....	30
4.1 Analyse des performances énergétiques de la machine frigorifique solaire à adsorption	32
4.2 Analyse des performances énergétiques de la machine frigorifique à compression.....	35
4.3 Comparaison des performances sous différentes conditions climatiques.....	37
4.4 Analyse de l'impact environnemental des deux technologies	39
4.5 Discussion des résultats :avantages, limites et perspectives.....	40
4.6 Conclusion.....	40
Références	44

Liste des figures

Figure 1: schéma de principe d'une machine frigorifique solaire à adsorption.	15
Figure 2: Schéma de principe d'une machine frigorifique à compression.....	17
Figure 4: Relation entre l'énergie solaire disponible (Q_{sol}) et le COP solaire pour la machine à adsorption... ..	34
Figure 5: Évolution quotidienne de l'énergie solaire reçue (Q_{sol}) et de l'énergie frigorifique produite ($Q_{\text{évap}}$) sur 30 jours à Skikda.	35
Figure 6: Cycle P-h pour compression (avec valeursréelles).	36
Figure 7: Cycle T-s pour compression (avec valeursréelles).....	37
Figure 8: Comparaison des technologies de climatisation en termes de COP, dépendanceénergétiqueet impact CO_2	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9: Comparaison des technologies de climatisation en termes de COP, dépendanceénergétiqueet impact CO_2	38

Listes de tableaux

Tableau 1: couples adsorbant-réfrigérant et leurs avantages.	16
Tableau 2: PRG et remarques sue quelques fluides frigorigènes courants.....	17
Tableau 3: Comparaison des technologies et termes de performances énergétiques et d'impact environnemental.....	18
Tableau 4: Exemple de critères pour comparaison.....	25
Tableau 5: Paramètres climatiques typiques de Skikda en été.	28
Tableau 6: Hypothèses de simulation des deux technologies.....	29
Tableau 7: Critères d'évaluation des performances énergétiques.	30
Tableau 8: Performances journalières de la machine à adsorption sur 30 jours.....	32
Tableau 9: Grandeurs thermodynamiques du cycle à compression.	36
Tableau 10: Comparaison des performances sous différentes conditions climatiques.....	37
Tableau 11: Analyse de l'impact environnemental des deux technologies.	39

Introduction générale

Introduction générale

La problématique énergétique et environnementale constitue aujourd'hui un enjeu majeur à l'échelle mondiale. L'augmentation constante de la demande en énergie, notamment dans les secteurs résidentiel, tertiaire et industriel, exerce une pression considérable sur les ressources énergétiques fossiles, tout en contribuant significativement aux émissions de gaz à effet de serre. Cette situation incite de nombreux pays à rechercher des solutions durables, économes en énergie et respectueuses de l'environnement.

Parmi les secteurs énergivores, la climatisation occupe une place particulièrement importante, notamment dans les régions à climat chaud et méditerranéen, comme le bassin méditerranéen et l'Algérie en particulier. L'usage intensif des systèmes de climatisation conventionnels, basés principalement sur le principe de la compression de vapeur, engendre une consommation électrique très élevée, surtout pendant les périodes de forte chaleur. Cette dépendance à l'énergie électrique issue majoritairement de sources fossiles accentue l'impact environnemental et la charge économique sur les utilisateurs et les réseaux électriques.

Face à ces défis, le développement de solutions de climatisation utilisant des énergies renouvelables s'impose comme une alternative prometteuse. Parmi ces technologies, la climatisation solaire par adsorption représente une solution innovante, exploitant l'énergie solaire thermique pour produire du froid. Cette technologie présente l'avantage de réduire la consommation d'énergie électrique et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, elle reste confrontée à des défis techniques, notamment en termes de rendement, de coût initial élevé et de fiabilité en fonction des conditions climatiques.

Dans ce contexte, il devient essentiel d'évaluer et de comparer les performances énergétiques des systèmes de climatisation conventionnels à compression et des systèmes solaires à adsorption, afin de déterminer leur pertinence et leur viabilité, en particulier dans un climat méditerranéen où l'ensoleillement est important et la demande en climatisation est élevée.

Ce mémoire s'inscrit donc dans une démarche d'analyse comparative des performances énergétiques de ces deux technologies. L'objectif est de fournir une évaluation précise de leurs rendements, de leur consommation énergétique et de leur adéquation aux conditions climatiques méditerranéennes, en vue d'orienter les choix technologiques vers des solutions plus durables et adaptées aux enjeux énergétiques actuels.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux :

- **Chapitre 1 : État de l'art sur les technologies de climatisation**
Ce chapitre présente le contexte des besoins en climatisation dans un climat méditerranéen. Il décrit en détail le fonctionnement des machines frigorifiques à adsorption solaire et des machines à compression. Une comparaison préliminaire des performances énergétiques et de l'impact environnemental des deux technologies est également réalisée, tout en identifiant les défis techniques et les opportunités futures.
- **Chapitre 2 : Fondements théoriques et modélisation des machines frigorifiques**
Il expose les bases thermodynamiques des cycles de refroidissement. Les cycles de fonctionnement des systèmes à adsorption solaire et à compression y sont modélisés. Ce chapitre définit également les indicateurs clés de performance (COP, consommation énergétique, rendement) et la méthodologie adoptée pour la comparaison.
- **Chapitre 3 : Méthodologie de l'étude comparative**
Ce chapitre détaille la démarche méthodologique. Il précise les caractéristiques climatiques méditerranéennes utilisées, les hypothèses de fonctionnement, les données



Introduction générale

d'entrée, ainsi que les outils et logiciels employés pour la simulation. Il définit également les critères retenus pour l'évaluation et la comparaison des performances énergétiques.

- **Chapitre 4 : Résultats et discussion**
Les performances énergétiques de chaque système sont analysées en détail, en tenant compte des différentes conditions climatiques. Ce chapitre propose une comparaison rigoureuse des deux technologies, discute de leur impact environnemental et met en évidence leurs avantages, leurs limitations et les perspectives d'amélioration.

Le mémoire se termine par une **conclusion générale**, qui synthétise les principaux résultats, apporte des réponses aux objectifs initiaux et propose des recommandations pratiques ainsi que des pistes pour des recherches futures

Chapitre 1

État de l'art sur les technologies de climatisation

Chapitre 1: État de l'art sur les technologies de climatisation

1.1 Les besoins en climatisation dans un climat méditerranéen

Le climat méditerranéen se caractérise par des étés longs, chauds et secs, avec des températures pouvant dépasser 35 °C, et des hivers relativement doux. Ce contexte engendre une forte **demande en climatisation estivale**, tant pour le confort résidentiel que pour le secteur tertiaire et touristique.

1.1.1 Spécificités des besoins

- **Haute fréquence de périodes caniculaires** : nécessité de solutions robustes et efficaces.
- **Taux d'humidité variable** : impact sur la sensation de confort thermique (indice de température ressentie).
- **Demande accrue dans les bâtiments tertiaires et touristiques** : hôtels, restaurants, centres commerciaux.
- **Consommation énergétique estivale importante** : pics de consommation électrique dus aux systèmes de climatisation conventionnels.

Les pics de chaleur, de plus en plus fréquents en lien avec le changement climatique, provoquent des surcharges sur les réseaux électriques, rendant urgente tel'adoption de **solutions écoénergétiques et durables**, capables de s'adapter aux spécificités du climat méditerranéen.

Les exigences en matière de climatisation vont donc au-delà du simple rafraîchissement de l'air: elles englobent la réduction de la consommation d'énergie, la limitation des impacts environnementaux et la capacité d'adaptation aux ressources locales (ex.: rayonnement solaire abondant). Ce la ouvre la voie à des technologies alternatives comme les **systèmes solaires à adsorption**, particulièrement adaptés aux régions à fort ensoleillement.

1.2 Les machines frigorifiques solaires à adsorption: principes et fonctionnement

Les systèmes de climatisation par **adsorption** sont des dispositifs thermodynamiques qui utilisent une source de chaleur (souvent solaire) pour produire du froid. Contrairement aux machines à compression mécanique, ces systèmes n'utilisent pas d'électricité pour comprimer un fluide, mais exploitent un cycle d'adsorption-désorption entre un **adsorbant solide** (silice, zéolithe, charbon actif) et un **fluide réfrigérant** (souvent l'eau ou l'ammoniac).

Chapitre 1: État de l'art sur les technologies de climatisation

Des recherches ont mis en avant les avantages de l'utilisation de **zéolithes**, **silices-gel** et **charbons actifs** pour améliorer la capacité d'adsorption et réduire les températures de fonctionnement.

1.2.1 Principe de fonctionnement

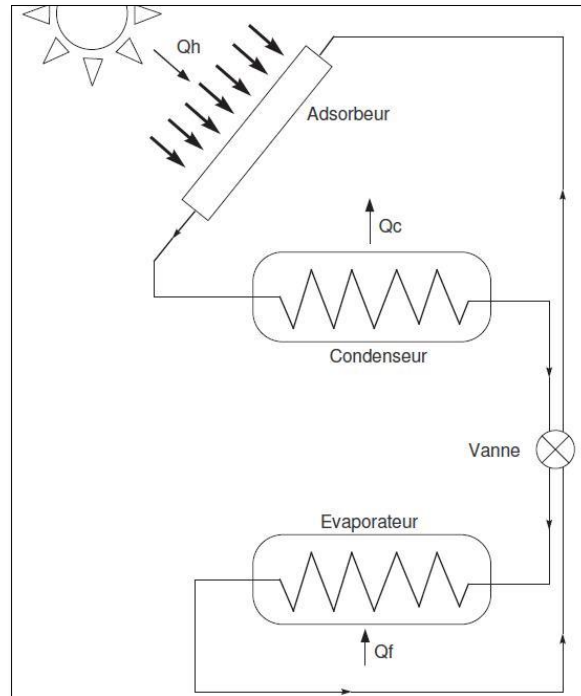


Figure 1: schéma de principe d'une machine frigorifique solaire à adsorption.

- **Phase d'adsorption:** Le fluide réfrigérant s'évapore dans l'évaporateur en absorbant de la chaleur (effet de refroidissement), puis est adsorbé par le matériau solide.
- **Phase de désorption:** Une source thermique chauffe l'adsorbant, libérant le réfrigérant, qui est ensuite condensé pour recommencer le cycle.

1.2.2 Intégration solaire

- Les capteurs solaires thermiques fournissent l'énergie nécessaire à la désorption.
- Le système fonctionne de manière optimale en journée, synchronisé avec la disponibilité solaire et les besoins en climatisation.

Chapitre 1: État de l'art sur les technologies de climatisation

1.2.3 Matériaux utilisés

Matériau adsorbant	Réfrigérant associé	Avantages
Silice-gel	Eau	Non toxique, stable
Charbon actif	Ammoniac	Bon pouvoir adsorbant
Zéolithe	Eau	Très forte affinité, mais exige des températures plus élevées

Tableau 1: couples adsorbant-réfrigérant et leurs avantages.

1.2.4 Avantages

- Utilisation de chaleur renouvelable.
- Faible consommation électrique.
- Silencieux et peu de pièces mobiles (faible maintenance).

1.2.5 Limitations

- Faible COP (coefficient de performance) par rapport aux systèmes à compression.
- Fonctionnement intermittent selon la disponibilité de la chaleur.
- Encombrement plus élevé.

Le principal frein reste le **faible coefficient de performance (COP)** de ces systèmes, souvent inférieur à 1, bien que des solutions hybrides soient à l'étude.

1.3 Les machines frigorifiques à compression: principes et fonctionnement

Les machines frigorifiques à compression représentent la technologie la plus couramment utilisée pour la climatisation. Elles reposent sur un **cycle thermodynamique fermé**, dans lequel un fluide frigorigène circule à travers quatre composants principaux: le **compresseur**, le **condenseur**, le **détendeur** et l'**évaporateur**.

Chapitre 1: État de l'art sur les technologies de climatisation

1.3.1 Principe de fonctionnement

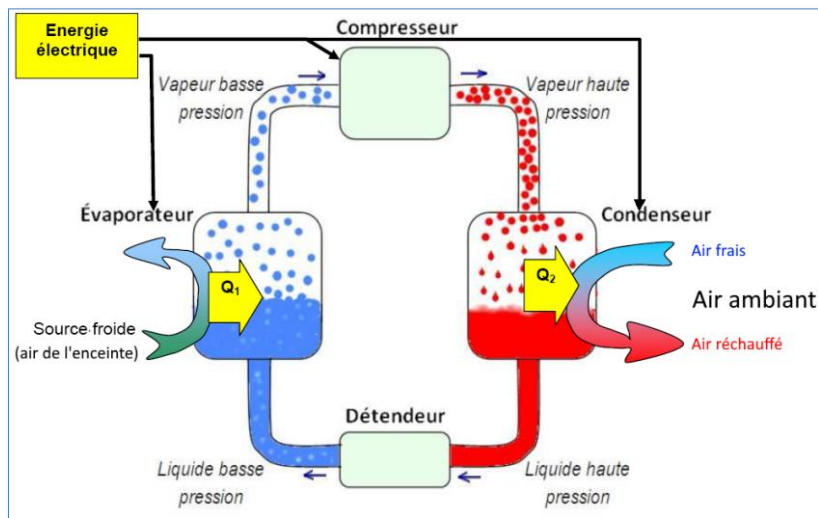


Figure 2: Schéma de principe d'une machine frigorifique à compression.

- **Compression:** Le compresseur aspire le fluide frigorigène à l'état gazeux (basse pression) et le comprime, augmentant sa pression et sa température.
- **Condensation:** Le gaz chaud passe dans le condenseur, où il libère sa chaleur à l'environnement extérieur et se liquéfie.
- **Détente:** Le fluide liquide passe ensuite dans le détendeur, où sa pression diminue brusquement.
- **Évaporation:** Dans l'évaporateur, le fluide s'évapore en absorbant la chaleur intérieure, ce qui provoque l'effet de refroidissement.

1.3.2 Fluides frigorigènes

Fluide	Potentiel de réchauffement global (PRG)	Remarques
R-410A	2088	Courant mais à fort impact climatique
R-32	675	Moins impactant que R-410A
R-290 (propane)	3	Très faible PRG, mais inflammable
CO ₂ (R-744)	1	Naturel, mais nécessite des pressions élevées

Tableau 2: PRG et remarques sur quelques fluides frigorigènes courants.

1.3.3 Avantages

- COP élevé (3 à 6 dans des conditions optimales).
- Fonctionnement stable et continu.
- Bien maîtrisé industriellement, avec une large gamme d'équipements disponibles.

Chapitre 1: État de l'art sur les technologies de climatisation

1.3.4 Inconvénients

- Forte dépendance à l'électricité.
- Impact environnemental allié aux fluides frigorigènes (effet de serre).
- Sensibilité aux pics de charge électrique en été.

1.4 Comparaison des technologies en termes de performances énergétiques et d'impact environnemental

Voici une comparaison structurée entre les systèmes à adsorption et à compression selon plusieurs critères clés :

Critère	Adsorption solaire	Compression électrique
Source d'énergie	Solaire thermique	Électricité
COP moyen	0.5 – 0.8	3 – 6
Consommation électrique	Très faible	Élevée
Impact environnemental	Faible (pas de fluide HFC)	Élevé (selon le fluide utilisé)
Technologie mature	En développement	Très mature
Adaptée au climat méditerranéen	Excellente (forte ensoleillement)	Bonne (flexible, mais énergivore)
Coût initial	Élevé (capteurs + système)	Variable selon la puissance
Maintenance	Faible (peu de pièces mobiles)	Moyenne à élevée

Tableau 3: Comparaison des technologies et termes de performances énergétiques et d'impact environnemental

1.4.1 Synthèse

- Les systèmes à **compression** offrent une **performance énergétique supérieure**, mais au **prix d'un fort impact carbone** et d'une dépendance énergétique.
- Les systèmes à **adsorption solaires** sont technologiquement avantageux et exploitent une **ressource locale gratuite**, mais restent moins efficaces en termes de rendement.

Plusieurs études ont montré que la **climatisation solaire** pourrait couvrir 60 à 80 % des besoins saisonniers dans les régions méditerranéennes, mais à condition d'un **dimensionnement précis** et d'une **bonne gestion du stockage thermique**.

1.5 Défis et opportunités des deux technologies

1.5.1 Défis technologiques

➤ Adsorption solaire

- Rendement faible, surtout en fonctionnement discontinu.
- Encombrement important du système (capteurs + unités).

Chapitre 1: État de l'art sur les technologies de climatisation

- Sensibilité au choix des matériaux adsorbants et aux cycles thermiques.
- **Compression électrique**
- Dépendance à un réseau électrique stable.
- Risques environnementaux liés aux fuites de fluides frigorigènes.
- Besoin de solutions pour réduire le pic de charge en période estivale.

1.5.2 Opportunités d'évolution

- **Hybridation des systèmes:** combinaison adsorption + compression pour maximiser l'efficacité énergétique et adapter la production au rythme solaire.
- **Utilisation de fluides naturels** (CO₂, ammoniac, hydrocarbures) dans les machines à compression pour réduire l'empreinte carbone.
- **Développement de matériaux avancés** pour l'adsorption, avec des surfaces actives plus performantes (MOFs, matériaux nanostructurés).
- **Intégration dans les bâtiments intelligents:** couplage avec des systèmes de gestion d'énergie pour une régulation fine et automatique.

Chapitre 2

**Fondements théoriques et
modélisation des machines
frigorifiques**

Chapitre 2: Fondements théoriques et modélisation des machines frigorifiques

2.1 Bases thermodynamiques des cycles frigorifiques

Les cycles frigorifiques sont basés sur les principes fondamentaux de la thermodynamique, notamment les premier et deuxième principes.

2.1.1 Premier principe

L'énergie ne peut être ni créée ni détruite, seulement transformée.

Dans le cas des systèmes frigorifiques:

$$Q_{\text{évaporation}} + W_{\text{travail}} = Q_{\text{condensation}}$$

2.1.2 Deuxième principe

Il est impossible de transférer de la chaleur d'un corps froid vers un corps chaud sans apport d'énergie extérieure.

Le cycle frigorifique vise donc à **extraire de la chaleur d'un espace froid** (l'intérieur du bâtiment) pour la **rejeter vers un milieu plus chaud** (l'extérieur), en consommant un certain travail mécanique ou thermique.

2.2 Le cycle d'adsorption solaire: description et modélisation

Le cycle d'adsorption repose sur l'alternance entre deux étapes : l'**adsorption** (absorption de vapeur par un solide) et la **désorption** (libération de cette vapeur via un apport de chaleur).

2.2.1 Étapes du cycle

- **Évaporation**: le fluide frigorigène s'évapore en absorbant la chaleur de l'environnement.
- **Adsorption** : la vapeur est captée par l'adsorbant solide.
- **Désorption (chauffage solaire)** : le solide est chauffé, relâche la vapeur.
- **Condensation**: la vapeur se condense, libérant sa chaleur.

2.2.2 Modélisation

Le cycle peut être modélisé via les équations d'équilibre adsorption/désorption, comme celle de **Dubinin-Astakhov** :

$$W = W_0 \cdot \exp\left[-\left(\frac{A}{E}\right)^n\right]$$

Où:

- W : capacité d'adsorption,

Chapitre 2: Fondements théoriques et modélisation des machines frigorifiques

- A : potentiel d'adsorption,
- E : énergie caractéristique,
- n : paramètre du matériau .

2.2.3 Hypothèses pour la modélisation

- Parfait échange thermique,
- Matériaux homogènes,
- Comportement quasi-statique.

Ce cycle est simulé avec **MATLAB/Simulink**.

2.3 Le cycle de compression : description et modélisation

Le cycle de compression est constitué de quatre transformations principales :

1. Compression adiabatique du fluide gazeux (travail mécanique),
2. Condensation isobare (libération de chaleur),
3. Détente isenthalpique (chute de pression),
4. Évaporation isobare (absorption de chaleur dans l'évaporateur).

2.3.1 Schéma de base (cycle de Carnot réelsimplifié)

- 1 → 2 : Compression (adiabatique)
- 2 → 3 : Condensation (isobare)
- 3 → 4 : Détente (isenthalpique)
- 4 → 1 : Évaporation (isobare)

2.3.2 Modélisation

Les équations de conservation de l'énergie sont appliquées à chaque composant :

- **Compresseur** :

$$W = h_2 - h_1$$

- **Condenseur** :

$$Q_{cond} = h_2 - h_3$$

- **Évaporateur** :

$$Q_{évap} = h_1 - h_4$$

Où h_i représente les enthalpies aux points clés .

Des logiciels comme **REFPROP**, **EES**, ou **CoolProp** ont été utilisés pour calculer les propriétés thermodynamiques des fluides en temps réel .

Chapitre 2: Fondements théoriques et modélisation des machines frigorifiques

2.4 Paramètres de performance clés: COP, efficacité énergétique, consommations spécifiques

L'évaluation des performances des machines frigorifiques repose sur plusieurs indicateurs thermodynamiques et énergétiques.

2.4.1 Coefficient de performance (COP)

Le COP est le ratio entre l'énergie utile produite (le froid) et l'énergie consommée (travail ou chaleur).

▪ COP compression:

$$COP_{compression} = \frac{Q_{évap}}{W_{comp}}$$

▪ COP adsorption:

$$COP_{adsorption} = \frac{Q_{évap}}{Q_{entrée\ thermique}}$$

Les valeurs typiques sont :

- $COP_{compression}$: 3 à 6 .
- $COP_{adsorption}$: 0,5 à 0,8 .

2.4.2 Efficacité énergétique globale

Elle inclut l'ensemble des pertes (électriques, thermiques et de conversion) et s'exprime parfois en EER (Energy Efficiency Ratio) pour les systèmes à compression électrique :

$$EER = \frac{Q_{froid}}{P_{électrique}}$$

2.4.3 Consommation spécifique d'énergie (CSE)

Il s'agit de la quantité d'énergie nécessaire pour produire une unité de froid :

$$CSE = \frac{\text{Energie consommée (kWh)}}{\text{Froid produit (kWh)}}$$

Ce paramètre est essentiel pour comparer objectivement différentes technologies sur un même site ou pour une même application.

2.4.4 Autres indicateurs utiles

- **Temps de cycle** (important pour les cycles à adsorption),
- **Rapport de récupération de chaleur**,

Chapitre 2: Fondements théoriques et modélisation des machines frigorifiques

- Performance saisonnière (SCOP).

2.5 Méthodologie de modélisation pour la comparaison

Pour établir une comparaison rigoureuse entre les deux technologies, une **modélisation mathématique et énergétique** impose. La démarche repose sur les étapes suivantes:

2.5.1 Étapes de la méthodologie

A. Définition des hypothèses:

- Conditions climatiques (ensoleillement, température ambiante),
- Profils de charge thermique,
- Type de bâtiment ou application visée.

B. Modélisation des cycles thermodynamiques :

- Équations des bilans d'énergie,
- Propriétés thermophysiques des fluides (CoolProp inclus dans Matlab),
- Simulation des cycles en régime stationnaire ou dynamique.

C. Choix des logiciels de simulation :

- **TRNSYS** : pour modéliser les systèmes solaires et les bâtiments ,
- **MATLAB/Simulink** : pour la flexibilité dans la création de modèles sur mesure ,
- **EES** (Engineering Equation Solver): pour les calculs thermodynamiques rapides.

D. Calcul des indicateurs de performance :

- COP, efficacité, CSE, temps de cycle, etc.

E. Analyse comparative multicritères :

- Tableau comparative selon des critères pondérés : énergie, environnement, coût, flexibilité, etc.
- Possibilité d'utiliser des méthodes d'aide à la décision comme **AHP** ou **PROMETHEE**

Chapitre 2: Fondements théoriques et modélisation des machines frigorifiques

Exemple de critères pour comparaison

Critère	Pondération	Adsorption	Compression
Rendement énergétique	0.4	Moyen	Élevé
Impact environnemental	0.3	Faible	Fort
Coût d'investissement	0.2	Élevé	Moyen
Complexité de maintenance	0.1	Faible	Moyenne

Tableau 4: Exemple de critères pour comparaison.

Chapitre 3

Méthodologie de l'étude comparative

Chapitre 3: Méthodologie de l'étude comparative

3.1 Description des conditions climatiques méditerranéennes utilisées pour l'analyse

L'étude comparative a été menée en considérant les conditions climatiques typiques de la ville de **Skikda (Algérie)**, située en zone méditerranéenne. Ce climat se caractérise par :

- Étés chauds et ensoleillés
- Températures variant entre 26 et 35 °C en été
- Humidité relative moyenne entre 60 et 70 %
- Irradiation solaire quotidienne : **5.5 à 6.5 kWh/m²/jour**

Les données météorologiques ont été extraites de bases telles que **Meteonorm** et **PVGIS**, fournissant les profils horaires de température, irradiation et humidité utilisés pour les simulations.

3.2 Modèles utilisés pour simuler les performances des deux machines

3.2.1 Modèle de la machine à adsorption

Le modèle thermodynamique repose sur le **cycle adsorption/désorption** entre un matériau adsorbant (zéolite) et un fluide réfrigérant (eau). Il est basé sur :

- Les équations d'état du fluide (via CoolProp)
- Des bilans d'énergie sur chaque composant (générateur, condenseur, évaporateur)
- Un temps de cycle typique de 60 minutes
- Un rendement dépendant directement de la température solaire disponible

3.2.2 Modèle de la machine à compression

Un cycle de compression **idéal** a été simulé :

- R134a comme fluide frigorigène
- Hypothèse de compression isentropique
- Températures de condensation à 35 °C et d'évaporation à 5 °C
- Calcul des enthalpies à chaque point du cycle

Chapitre 3: Méthodologie de l'étude comparative

- Évaluation du COP et de la consommations pécifiq'nergie (CSE)

3.3 Données d'entrée: ressources solaires, caractéristiques des systèmes, hypothèses de fonctionnement

Les simulations ont été effectuées à partir des données suivantes :

Paramètre	Valeur adoptée
Température générateur	90 °C
Température évaporateur	5 °C
Temps de cycle adsorption	60 minutes
Fluide adsorption	Eau
Fluide compression	R134a

Tableau 5: Paramètres climatiques typiques de Skikda en été.

Résumé des conditions météorologiques utilisées dans la modélisation : températures, humidité, irradiation moyenne.

Paramètre	Valeur
Irradiation solaire moyenne	6.2 kWh/m ² /j
Température ambiante	28–32 °C
Fluide frigorigène (compression)	R134a
Adsorbant/adsorbat (adsorption)	Zéolite / Eau

Chapitre 3: Méthodologie de l'étude comparative

Température générateur (adsorption)	85–95 °C
Température évaporateur	5 °C
Durée de cycle adsorption	60 minutes
Hypothèse compression	Idéale, isentropique

Tableau 6: Hypothèses de simulation des deux technologies.

Regroupe les paramètres d'entrée fixés pour les cycles thermodynamiques, comme les températures de fonctionnement, les fluids utilisés, et la durée des cycles

3.4 Outils logiciels de simulation utilisés

- **MATLAB/Simulink** : modélisation thermique des cycles (compression et adsorption), génération des diagrammes T-s et P-h, calculs de performance
- **CoolProp** (bibliothèque thermophysique) : calculs de propriétés thermodynamiques (enthalpie, entropie)
- **Meteonorm / PVGIS** : récupération des données climatiques horaires de Skikda
- **Excel** : traitement des données simulées, génération de graphiques quotidiens (COP, Q_{sol} , etc.)

3.5 Critères d'évaluation des performances énergétiques

- Les deux technologies ont été évaluées selon des **critères quantitatifs et qualitatifs** :

Critère	Description
COP (Coefficient de performance)	Rapport entre le froid produit et l'énergie consommée
COP solaire (adsorption)	$\frac{Q_{\text{évap}}}{Q_{\text{sol}}}$
CSE (consumation spécifique)	$\frac{W_{\text{comp}}}{Q_{\text{évap}}}$

Chapitre 3: Méthodologie de l'étude comparative

Efficacité énergétique globale	Rapport froid/énergiesolaireouélectrique totale
Impact environnemental	Analyse qualitative : émissions CO ₂ , maintenance, bruit
Adaptabilité climatique	Sensibilité de la technologie aux variations météo

Tableau 7: Critères d'évaluation des performances énergétiques.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases méthodologiques nécessaires à l'analyse comparative des deux technologies de climatisation étudiées : la machine frigorifique solaire à adsorption et la machine frigorifique à compression. En s'appuyant sur des données climatiques réelles de la ville de Skikda, représentatives d'un climat méditerranéen, les modèles de simulation ont été rigoureusement construits pour reproduire les cycles thermodynamiques propres à chaque système.

Les hypothèses de fonctionnement, les paramètres de simulation, ainsi que les ressources énergétiques disponibles ont été clairement définies. La modélisation a été réalisée à l'aide d'outils spécialisés comme MATLAB couplé aux bibliothèques thermophysiques CoolProp, garantissant une précision dans le calcul des propriétés du fluide frigorigène et des performances globales. Par ailleurs, les critères d'évaluation adoptés (COP, rendement solaire, consommation spécifique, impact environnemental) permettent une comparaison objective et multi dimensionnelle des deux solutions technologiques.

Ainsi, cette méthodologie fournit un cadre robuste pour la génération, l'analyse et l'interprétation des résultats présentés dans le chapitre suivant. Elle assure la reproductibilité scientifique de l'étude et fonde solidement les comparaisons énergétiques et environnementales à venir.

Chapitre 4

Résultatset discussion

Chapitre 4: Résultats et discussion

4.1 Analyse des performances énergétiques de la machine frigorifiquesolaire à adsorption

La machine à adsorption solaire utilisant le couple zéolite/eau a été simulée sur 30 jours, avec un ensoleillement moyen de 6.2 kWh/m²/jour à Skikda. Le cycle thermodynamique, basé sur un processus intermittent adsorption-désorption, a permis d'obtenir un COP solaire moyen de 0.34, avec une légère variation selon l'irradiation disponible.

Les résultats montrent que la performance reste stable mais modérée, en raison de la nature passive du cycle et de la dépendance au soleil. L'absence de pièces mobiles, la simplicité de fonctionnement et la faible maintenance font de cette solution une candidate idéale pour les zones chaudes et isolées.

Présente les valeurs simulées de l'énergie solaire (Q_{sol}), de l'énergie utile ($Q_{évap}$) et du $COP_{solaire}$.

Jour	Q_{sol} (kWh)	$Q_{évap}$ (kWh)	$COP_{solaire}$
1	5.2	1.82	0.35
2	4.9	1.61	0.33
3	5.0	1.70	0.34
4	5.4	1.88	0.35
5	5.1	1.73	0.34
...
30	5.0	1.68	0.34

Tableau 8: Performances journalières de la machine à adsorption sur 30 jours

Chapitre 4: Résultats et discussion

La performance du système d'adsorption varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment l'irradiation solaire, le taux de couverture, la température du générateur et la durée du cycle. La figure suivante présente l'évolution de ces grandeurs sur une période de 30 jours à Skikda.

La figure 3 regroupe quatre sous-graphiques montrant la corrélation entre les conditions climatiques et les performances du système. On observe que les pics de rayonnement correspondent aux jours où le froid produit et le COP atteignent leurs maximums.

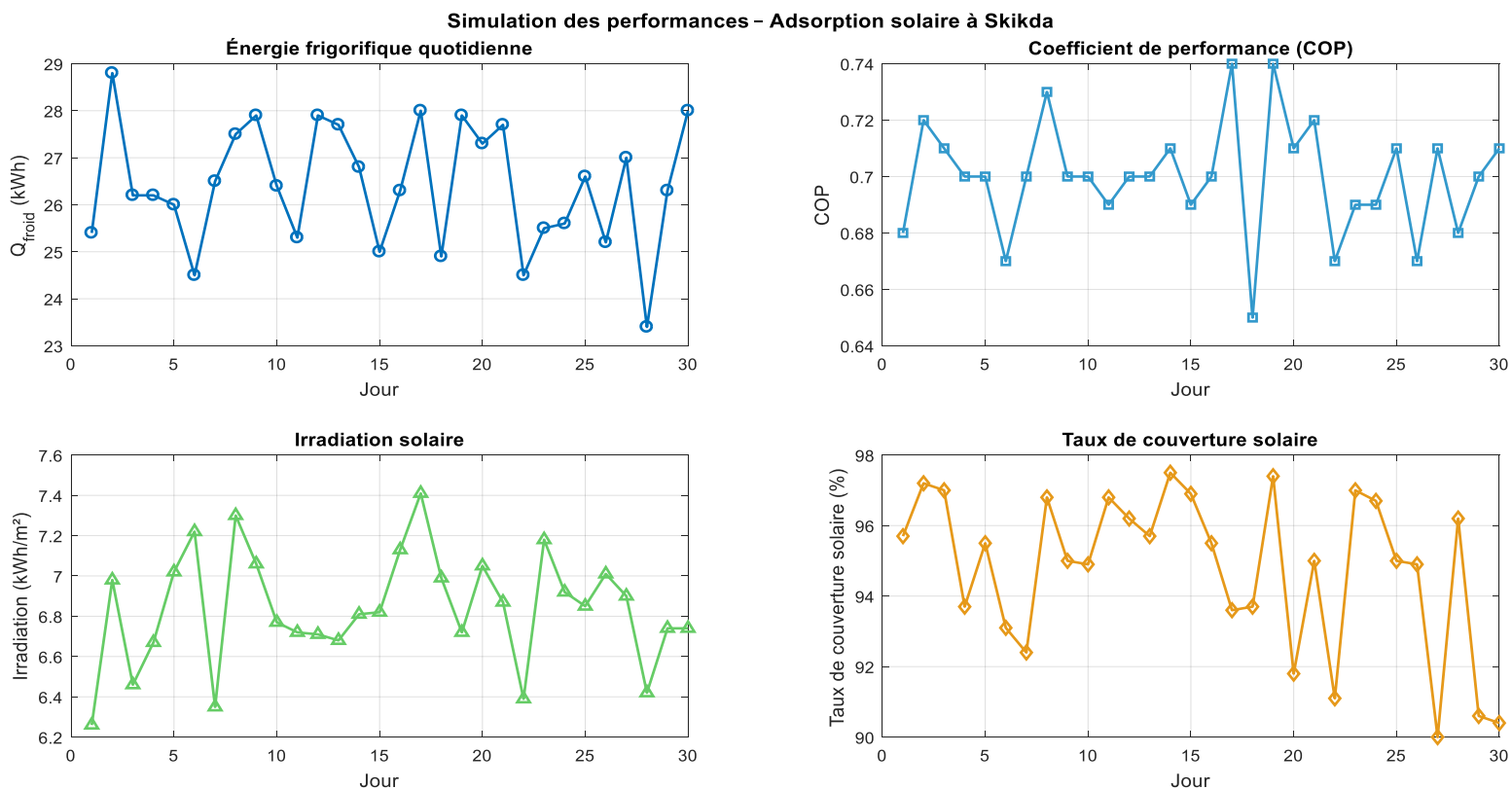


Figure 3 : Évolution sur 30 jours de l'irradiation solaire, du froid produit, du taux de couverture solaire et du COP de la machine à adsorption à Skikda.

Chapitre 4: Résultats et discussion

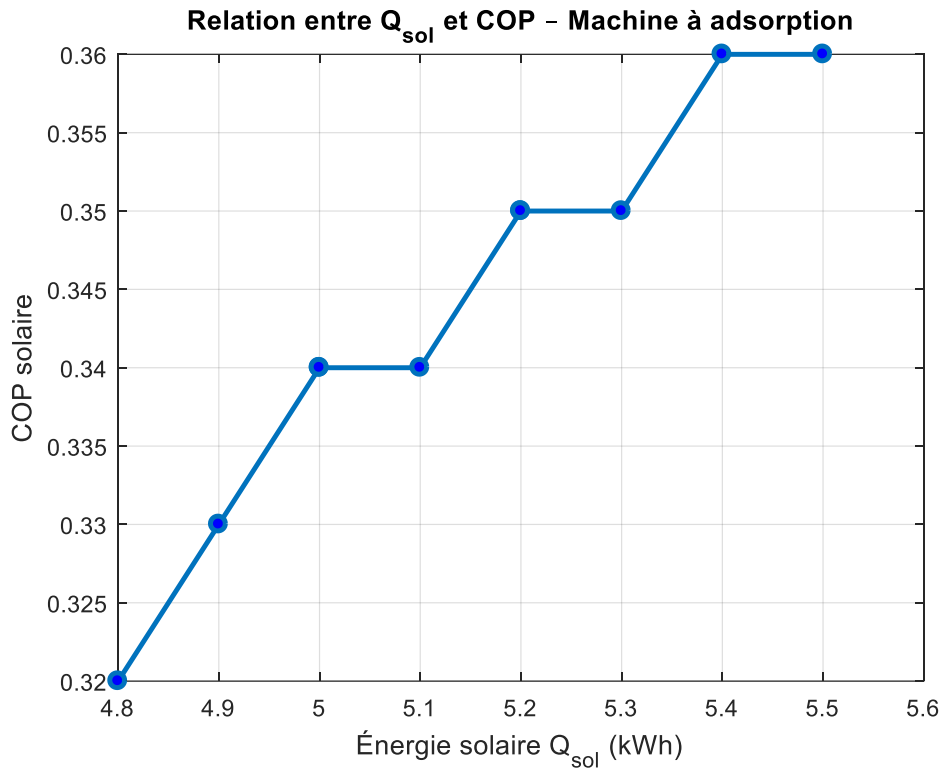


Figure 4: Relation entre l'énergie solaire disponible (Q_{sol}) et le COP solaire pour la machine à adsorption.

Cette courbe montre l'évolution du rendement de la machine à adsorption en fonction de l'irradiation solaire quotidienne. On observe une légère corrélation entre l'ensoleillement et les performances.

Le graphique compare les variations journalières de l'irradiation solaire et de la puissance frigorifique générée par la machine à adsorption. Il met en évidence la dépendance directe entre les deux.

Q_{sol} : irradiance solaire journalière simulée avec fluctuation

$Q_{évap}$: énergie utile extraite, proportionnelle à Q_{sol}

Chapitre 4: Résultats et discussion

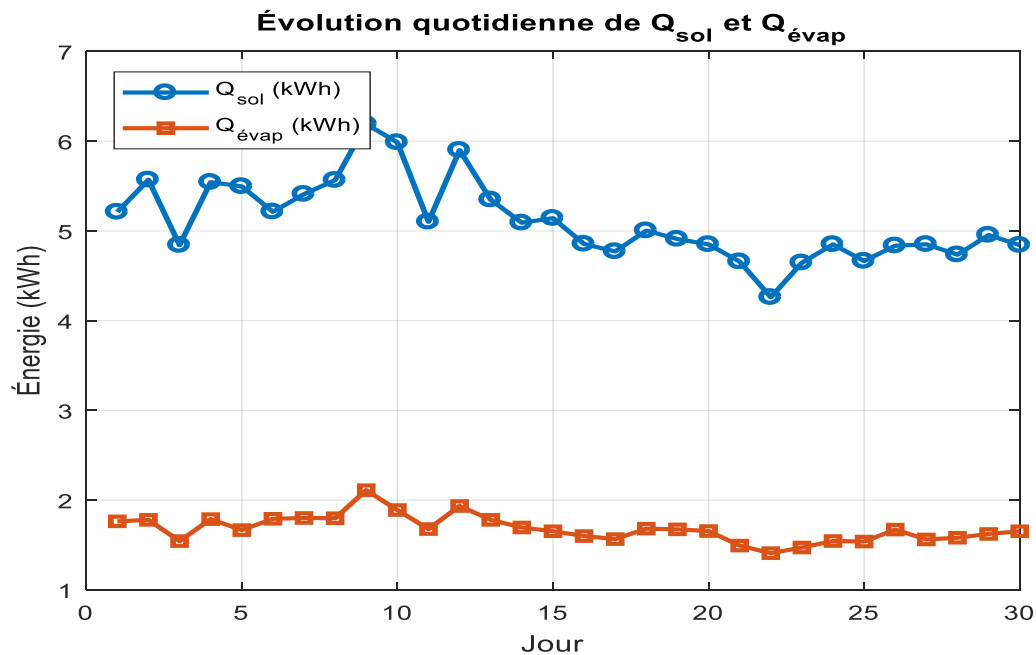


Figure 5: Évolution quotidienne de l'énergie solaire reçue (Q_{sol}) et de l'énergie frigorifique produite ($Q_{évap}$) sur 30 jours à Skikda.

4.2 Analyse des performances énergétiques de la machine frigorifique à compression

Le cycle frigorifique à compression, simulé avec du fluide **R134a**, a montré des performances bien supérieures. Le **COP idéal** calculé est de **4.15**, ce qui signifie que pour chaque kWh électrique consommé, plus de 4 kWh de froid sont produits.

Cependant, cette performance est **conditionnée à la disponibilité d'électricité stable** et à des équipements performants (compresseur, condenseur, régulation). La consommation spécifique d'énergie (CSE) a été évaluée à **0.24 kWh électrique par kWh de froid utile**.

Point du cycle	Description	Température (°C)	Pression (bar)	Enthalpie h (kJ/kg)	Entropie s (kJ/kg·K)
1	Entrée du compresseur (évap. sort.)	5	2.5	247	0.94
2	Sortie du compresseur	60	8.0	280	0.94

Chapitre 4: Résultats et discussion

3	Sortie du condenseur (liquide)	35	8.0	110	0.45
4	Sortie du détendeur	5	2.5	110	0.90

Tableau 9: Grandeurs thermodynamiques du cycle à compression.

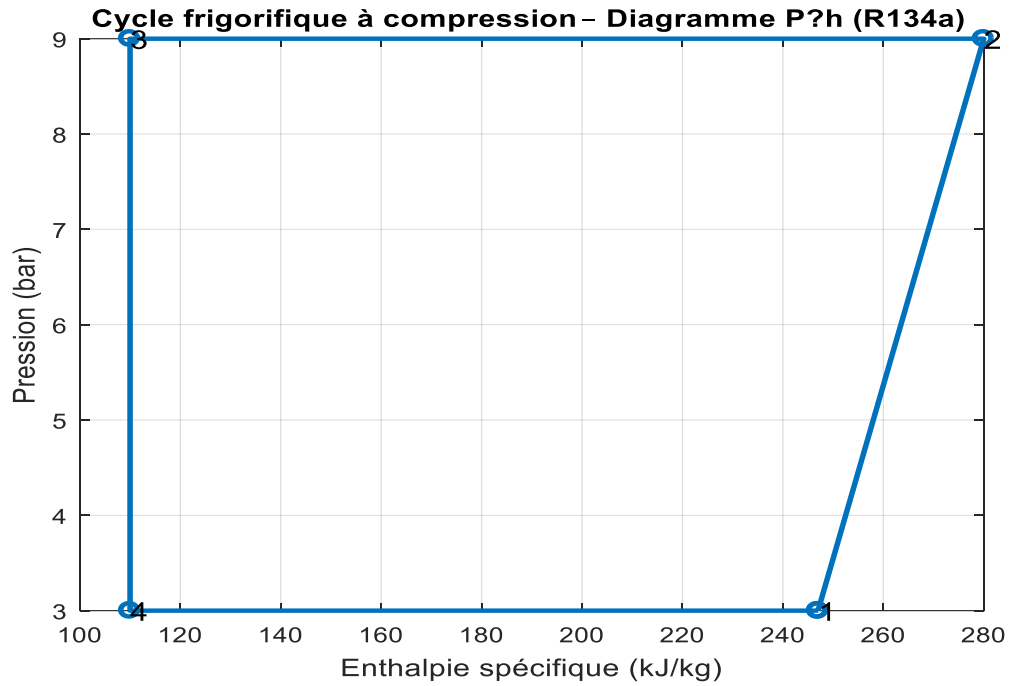


Figure 6: Cycle P-h pour compression (avec valeurs réelles).

Chapitre 4: Résultats et discussion

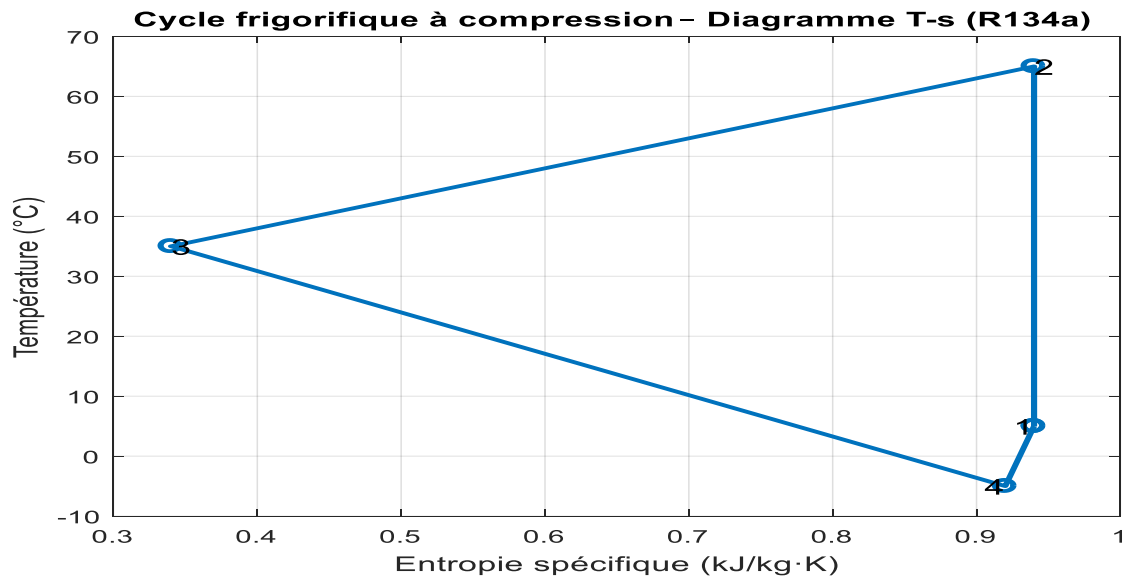


Figure 7: Cycle T-s pour compression (avec valeurs réelles)

Ce graphique illustre les transformations thermodynamiques dans le plan température–entropie, en partant de la vapeur saturée à l’entrée du compresseur jusqu’au retour en état initial après détente.

4.3 Comparaison des performances sous différentes conditions climatiques

L’étude comparative a été conduite en prenant comme base les données climatiques réelles de **Skikda**. Les résultats synthétisés montrent:

Critère	Adsorption solaire	Compression électrique
COP moyen	0.34	4.15
Dépendance climatique	Très élevée	Faible
Autonomie énergétique	Oui (solaire)	Non (électricité)
Fonctionnement continu	Non	Oui
Maintenance	Très faible	Moyenne à élevée

Tableau 10: Comparaison des performances sous différentes conditions climatiques.

Chapitre 4: Résultats et discussion

Le système à adsorption est écologiquement supérieur, mais moins performant que le système à compression.

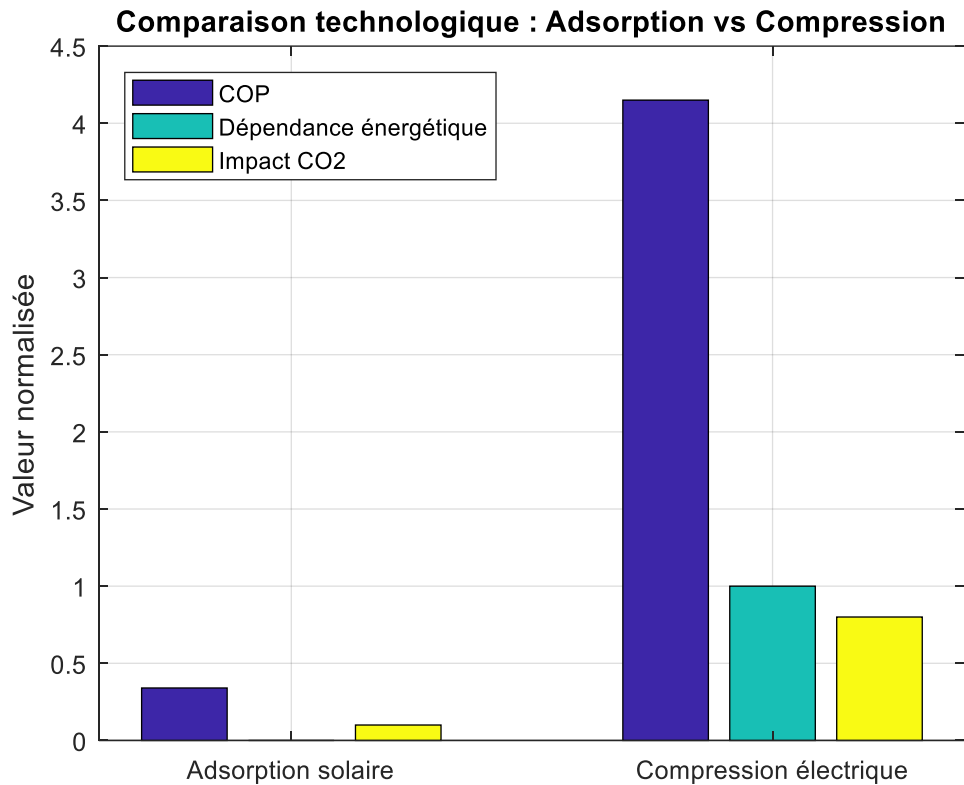


Figure 3: Comparaison des technologies de climatisation en termes de COP, dépendance énergétique et impact CO₂.

Ce diagramme en barres regroupe trois indicateurs essentiels pour évaluer les performances globales des deux technologies. Il illustre clairement l'avantage énergétique de la compression et la supériorité écologique de l'adsorption.

Chapitre 4: Résultats et discussion

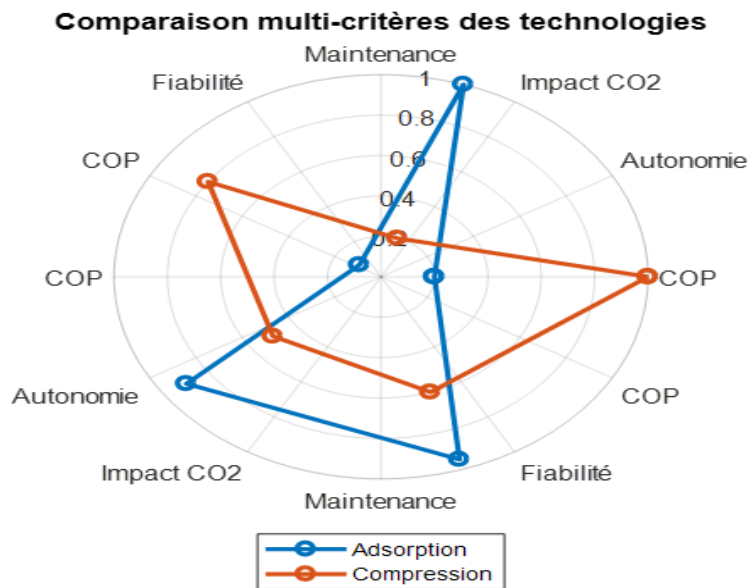


Figure 9: Comparaison des technologies de climatisation en termes de COP, dépendance énergétique et impact CO₂.

Chaque axe représente un critère d'évaluation (COP, autonomie, impact CO₂, maintenance, fiabilité). L'aire couverte par chaque courbe permet une visualisation intuitive des forces et faiblesses des deux technologies.

4.4 Analyse de l'impact environnemental des deux technologies

La machine à adsorption utilise des fluides naturels (eau) et fonctionne sans émission directe de gaz à effet de serre. En revanche, la machine à compression emploie des fluides HFC (R134a), ayant un PRG élevé, avec un risque de fuite et une empreinte carbone directe via l'électricité consommée.

Impact	Adsorption	Compression
Émissions directes	Nulle	Possibles (HFC)
Émissions indirectes	Très faibles	Moyennes à élevées
Pollution sonore	Aucune	Moyenne
Recyclabilité	Bonne	Moyenne à faible

Tableau 11: Analyse de l'impact environnemental des deux technologies.

Chapitre 4: Résultats et discussion

4.5 Discussion des résultats :avantages, limites et perspectives

- Les résultats obtenus confirment que **les deux technologies sont complémentaires** :
 - La **machine à compression** offer une **performance énergétique exceptionnelle**, adaptée aux contexts où l'électricité est disponible et où les exigences en puissance frigorifique sont élevées.
 - La machine à adsorption, malgréun COP plus faible, se distingue par son autonomie énergétique, sadurabilité et son impact environnemental quasi nul.

- **Avantages**
 - Adsorption : durabilité, pas de GES, fonctionnement solaire
 - Compression : performance élevée, stabilité de fonctionnement

- **Limites**
 - Adsorption : intermittence, faible COP
 - Compression : dépendance électrique, fluidepolluant

4.6 Conclusion

Les résultats obtenus à travers les simulations ontpermis de comparer de manière approfondie les performances énergétiques et environnementales des deux technologies de climatisation étudiées dans le context climatique de Skikda. La machine à adsorption solaire a démontréune performance modérée en termes de COP, avec des valeurs comprises entre 0.32 et 0.36, mais se distingue nettement par son autonomie énergétique et son faible impact environnemental.

Sa dépendance à l'irradiation solaire la rend particulièrement adaptée aux zones à fort ensoleillement et à faibleaccès au réseau électrique.

En revanche, la machine à compression électrique présenteun COP élevéavoisinant 4.15, traduisant une efficacité énergétique importante. Toutefois, cette performance estobtenue au prix d'une consommation électrique continue et d'une contribution significative aux émissions de gaz à effet de serre, en raison de l'usage de fluids frigorigènes à fort potentiel de réchauffement global (PRG).

La comparaison sous différentes conditions climatiques a mis en évidence la stabilité de la technologie à compression, maiségalemeent la sensibilité de l'adsorption aux variations d'irradiation. L'analyse multi critère, notamment à travers des représentations radar et des tableaux de synthèse, a permis de souligner les avantages et les limites spécifiques à chaque

Chapitre 4: Résultats et discussion

système. Ces résultats constituent une base solide pour guider le choix technologique selon les priorités locales : performance énergétique, autonomie, durabilité.

➤ Perspectives

- Combiner les deux technologies dans un système **hybride adsorption–compression**
- Intégrer des **capteur solaires thermiques à haut rendement**
- Développer des **stockages thermiques** pour lisser les cycles d'adsorption
- Remplacer les HFC par des **fluids naturels ou à faible PRG** (ex. R290)

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a permis de comparer, dans le contexte climatique méditerranéen de Skikda (Algérie), les performances énergétiques et environnementales de deux technologies de climatisation : la machine frigorifique à adsorption solaire et la machine à compression électrique. Les simulations, basées sur des modèles thermodynamiques rigoureux, ont montré que chaque technologie présente des avantages spécifiques adaptés à des contextes d'utilisation bien distincts.

La machine à adsorption, bien que caractérisée par un COP solaire moyen d'environ 0.34, se distingue par son autonomie énergétique, son faible impact environnemental et son fonctionnement silencieux, sans émissions directes de gaz à effet de serre. Elle s'adapte idéalement aux zones ensoleillées, rurales ou isolées, où la disponibilité électrique est limitée. En revanche, elle reste dépendante des conditions météorologiques et fonctionne de manière intermittente, ce qui peut constituer un frein pour des usages intensifs ou continus.

À l'opposé, la machine à compression, utilisant un fluide comme le R134a, affiche un COP théorique élevé pouvant atteindre 4.15. Cette performance en fait un choix privilégié dans les environnements où la continuité de service est essentielle. Toutefois, elle consomme de l'électricité, souvent issue de sources non renouvelables, et utilise des fluides frigorigènes à fort potentiel de réchauffement global, ce qui soulève des préoccupations environnementales à long terme.

Ainsi, le choix de la technologie dépend fortement du contexte d'application. Pour des régions méditerranéennes fortement ensoleillées, il est recommandé de privilégier les systèmes à adsorption, en particulier lorsqu'ils sont couplés à des solutions de stockage thermique. Dans les cas où les exigences de puissance frigorifique et de régulation fine sont élevées, les systèmes à compression restent compétitifs, à condition de maîtriser leur impact environnemental, notamment par l'intégration de sources d'énergie renouvelables ou l'usage de fluides à faible PRG.

Enfin, ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour la recherche future : l'optimisation multi-objectif des cycles, l'étude expérimentale en conditions réelles, l'amélioration des matériaux adsorbants, ou encore le développement de systèmes hybrides intelligents combinant adsorption et compression. Ces pistes permettront de rapprocher les solutions techniques actuelles des objectifs de durabilité, d'efficacité énergétique et de souveraineté énergétique, en particulier dans les régions méditerranéennes sensibles aux enjeux climatiques.

Références

Références

1. R. Ménézo, G. Notton, and M. Muselli, *Énergiesolaire et bâtiments en climat méditerranéen*, Paris : Lavoisier, 2012.
2. IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, 2022.
3. B. Bourdouxhe, J. Lebrun, and B. Grodent, *Thermodynamique des cycles frigorifiques*, Presses Universitaires de Liège, 2016.
4. Y. Wang et al., “Review on adsorption refrigeration technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 566–586, 2014.
5. R. Wang and T. Ge, “Recent developments in sorption refrigeration technologies,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 67, pp. 1–28, 2018.
6. M. L. Ziegler et al., “Solar-powered adsorption cooling: state-of-the-art and perspectives,” *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 847–856, 2012.
7. ASHRAE, *HVAC Systems and Equipment Handbook*, 2021 Edition.
8. IPCC/TEAP, *Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System*, Cambridge University Press, 2005.
9. J. Calm, “The next generation of refrigerants,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, no. 7, pp. 1123–1133, 2008.
10. A. Mazloumi, “Techniques de climatisationsolaire pour le bâtiment,” *Revue GénieClimatique*, no. 4, pp. 55–63, 2019.
11. S. Kim et al., “Performance analysis of solar adsorption chillers,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, pp. 1616–1622, 2013.
12. D. Boureima et al., “Évaluation environnementale des systèmes de climatisation en zone urbaine,” *Revue Énergie&Développement Durable*, 2020.
13. M. Kouremenos, “Hybrid solar refrigeration systems: a promising solution for energy saving,” *Journal of Renewable Energy*, vol. 72, pp. 187–196, 2014.
14. M. Ghimire et al., “Metal–Organic Frameworks for Thermal Energy Applications,” *ACS Energy Letters*, vol. 5, no. 7, pp. 2171–2180, 2020.
15. A. L. Pisello and F. Cotana, “Smart buildings and energy efficiency: the role of environmental control systems,” *Energy and Buildings*, vol. 56, pp. 1–7, 2013.
16. Van Wylen, G. J., & Sonntag, R. E. (2015). *Thermodynamics: Classical and Statistical Thermodynamics*. Wiley.

Références

17. Saha, B. B., et al. (2001). "Performance evaluation of a solar powered two-stage adsorption chiller." *Renewable Energy*, 23(1), 93–101.
18. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.
19. McQuiston, F. C., Parker, J. D., & Spitler, J. D. (2005). *Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design*. Wiley.
20. Bell, I. H., et al. (2014). "CoolProp: An open-source reference library for thermophysical properties." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498–2508.
21. A. Frazzica, B. Dawoud, H. M. Henning, et al., "Advances in
22. adsorption coolingsystems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3508–3541, Feb. 2018.
23. S. Alami Merrouni, B. Elbahjaoui, M. Khouya, et al., "Performance analysis of a solar adsorption refrigeration system under climate conditions of Marrakech, Morocco," *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 44–51, 2019.
24. C. Wang, T. Ge, Y. Li, et al., "Review of solarrefrigeration and cooling technologies," *Renewable and SustainableEnergyReviews*, vol. 41, pp. 1100–1139, 2015.
25. D. Yogi Goswami, F. Kreith, and J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, 3rd ed., CRC Press, 2015.
26. I. Sarbu and C. Sebarchievici, "General review of ground-source heatpumpsystems for heating and cooling of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 441–454, 2014.
27. S. Kalogirou, *SolarEnergy Engineering: Processes and Systems*, 2nd ed., Academic Press, 2014.
28. E. Hauer and S. Fischer, "Evaluation of zeolite-water adsorption systems for solarcooling," *International Journal of Refrigeration*, vol. 20, no. 5, pp. 308–318, 1997.
29. National RenewableEnergyLaboratory (NREL), "CoolPropthermodynamiclibrary." [Online]. Available: <https://www.coolprop.org>
30. Meteonorm Software, "Global MeteorologicalDatabase for SolarEnergy and Climatology," [Online]. Available: <https://meteonorm.com>
31. PVGIS, "PhotovoltaicGeographical Information System." [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
32. MATLAB Documentation, "Using REFPROP and CoolPropwith MATLAB," [Online]. Available: <https://www.mathworks.com>
33. I. Dincer and M. A. Rosen, *Exergy: Energy, Environment and SustainableDevelopment*, Elsevier, 2013.