

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOQRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Saad Dahleb Blida 1 Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de mécanique
Spécialité : installation énergétique et turbomachines

Étude de comportement thermique du
plafond rafraichissant

Réalisé par :

- Guessoum Bachir
- Kouadria Amdjed

Promoteurs :

- Mr. A.E.K Hamid

Co-promoteurs

-MME. W. Mahmoud Farah

Année universitaire
2024/2025

Remerciements

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والصلاة والسلام على سيد الخلق والمرسلين، سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم، وعلى آل ه وصحبه أجمعين.

يسرنا أن نعبر عن عميق شكرنا وامتناننا لكل من ساهم في إنجاز هذا العمل ، وكان لنا عوناً وسنداً خلال مختلف مراحل إعداد

هذه المذكرة.

نتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى مشرفينا المحترمين:

بروفيسور

د. ق. حميد، والدكتور و. ف. محموش، على توجيهاتهما القيمة، وملاحظتهما البناءة، ودعمهما المستمر، الذين كان لهما الأثر الكبير في

توجيه هذا العمل نحو الأفضل.

كما نخص بالشكر الجليل السيدة فرح محمودش على مساعدتها الخاصة، وتوفع أنيها في تقديم الدعم المعنوي والعلمي.

ولا يسعنا إلا أن نعبر عن امتناننا العميق لعائلاتنا الكريمة التي لم تبخل علينا بالدعم والتشجيع طوال مسيرتنا الدراسية.

كما لا ننسى أن نشكر كل زملائنا الذين ساعدونا وشجعونا خلال هذا المشوار العلمي، راجين من الله أن يوفقهم جميعاً.

نسأل الله أن يجعل هذا العمل في ميزان حسناتنا، وأن يكون نافعا لنا في حياتنا العلمية والعملية.

Résumé

Dans ce travail on a étudié le comportement thermique d'un panneau radiant rafraichissant intégré à un bureau à travers plusieurs simulations avec le logiciel TRNSYS avec plusieurs matériaux de construction et dans les différentes zones climatiques Algériennes.

Les résultats montrent que le rafraichissement par rayonnement du plafond réduit considérablement les températures intérieures, avec des température allant de 6°C à 13°C en fonction du type de mur et des conditions climatiques extérieures.

Cette étude souligne l'importance d'intégrer des solutions de refroidissement passives et semipassives avec des enveloppes de bâtiment appropriées pour améliorer le confort intérieur et réduire durablement la consommation d'énergie.

Mots clés : Panneau rafraichissant, confort thermique, climatisation, température

الملخص:

في هذا العمل، قمنا بدراسة السلوك الحراري للوحة تبريد إشعاعي مدمجة في سقف مكتب، وذلك من خلال عدة محاكاة مع استخدام مواد بناء متعددة وفي مناطق مناخية جزائرية مختلفة باستخدام برنامج TRNSYS. النتائج تظهر أن التبريد الإشعاعي عبر السقف يساهم بشكل كبير في خفض درجات الحرارة الداخلية، حيث تتراوح الانخفاضات المسجلة بين 6 درجات مئوية و 13 درجة مئوية، وذلك حسب نوع الجدار والظروف المناخية الخارجية. هذه الدراسة أهمية دمج حلول التبريد السلبية ونصف السلبية مع أغلفة بناء مناسبة، من أجل تحسين الراحة الحرارية الداخلية وتقليل استهلاك الطاقة بشكل مستدام. **الكلمات المفتاحية:** لوحة التبريد، الراحة الحرارية، تكييف الهواء، درجة الحرارة

Abstract:

In this work, we studied the thermal behavior of a radiant cooling panel integrated into an office through several simulations with the TRNSYS software using many building materials and in different Algerian climatic zones.

The results show that ceiling radiation cooling significantly reduces indoor temperatures, with ranging from 6°C to 13°C depending on the type of wall and outdoor climate conditions.

This study highlights the importance of integrating passive and semi-passive cooling solutions with appropriate building envelopes to improve indoor comfort and sustainably reduce energy consumption

Keywords: Cooling panel, thermal comfort, air conditioning, temperature

Sommaire

Remerciements Résumé

Sommaire

Liste de figure

Liste de tableau

Introduction générale : 1

Chapitre 1 :

Etude bibliographique

1.Introduction : 5

2.Le Rafraîchissement des Bâtiments : 5

2.1.Objectifs : 5

2.2.Rafraîchissement Passif (Zéro Énergie) : 5

2.2.1.Protection solaire & Ombre Naturelle : 5

2.2.2. Inertie Thermique& Ventilation Nocturne6

2.2.3.Réflexion de la Chaleur : 6

2.3.Exemples d'Applications : 6

3.Rafraîchissement Actif : 7

4.Technologies Clés du Rafraîchissement Actif : 7

4.1. Systèmes à Compression (Climatisation Classique) : 7

4.2.Pompes à Chaleur Réversibles : 8

4.3.Rafraîchissement Adiabatique Indirect ; 8

4.4.Géo-cooling (Échange avec le Sol) : 9

4.5.Systèmes Radiants Actifs :..... 9

5.Plafond Radiant : 10

5.1.Fonctionnement :11

5.2.Caractéristiques principales :11

5.3.Description du système :11

6.Etat de l'art : 14

Chapitre 02

Présentation du cas d'étude

1. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE : 24

1.1 Introduction 24

1.2 Description du bureau 24

1.1.2 Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux de constructions :	24
1.1.2.3 Conductivité thermique (λ) :	25
1.1.2.4 Capacité thermique massique (c ou Cp) :	25
1.1.2.5 Densité (ρ) :	25
1.1.2.6 Diffusivité thermique (α) :	25
1.1.2.7 Effusivité thermique :	25
1.3. Présentations des villes choisies :	26

Chapitre 03

Modélisation

1. Introduction :	29
2. Présentation du modèle :	29
3. Les différentes configurations des murs utilisés :	29
3.1. Type A mur standard :	30
3.2. Type B mur isolé :	30
3.3. Type C mur lourd :	31
4. Les hypothèses de nos simulations :	32

Chapitre5

Résultat et interprétation43

1. Validation des résultats :	44
1.1. La comparaison entre les températures intérieures du bureau rafraîchis avec des panneaux de natte capillaire et le panneau de plafond radiant :	44
1.2. La comparaison entre les températures intérieure du bureau digitalisées et simulées avec des nattes capillaires :	44
1.3. Les températures ambiantes (extérieures) :	46
2. L'effet du panneau rafraîchissant avec le mur double brique à Bejaia :	47
2.1 L'effet du panneau rafraîchissant avec le mur double brique dans les villes du sud : ...	49
2.3 Effet du panneau rafraîchissant avec le mur isolant à Bejaia :	51
2.4 Effet du panneau rafraîchissant avec le mur isolant à Mechria :	52
2.5 Effet du panneau rafraîchissant avec le mur isolant dans les villes du sud :	53
2.6 Effet du panneau rafraîchissant avec le mur en brique de terre cuite pleine « C » à Bejaia :	55
2.7 Effet du panneau rafraîchissant avec le mur en brique de terre cuite pleine à Mechria :	56

2.8 Effet du panneau rafraichissant avec le mur en brique de terre cuite pleine dans les villes du sud :	58
3. Compraison des temperatures interieures du bureau obtenues dans la ville de Bejaia zone E1:	61
4. Comparaison des temperatures interieures du bureau obtenues dans la ville de Mechria zone E2:	63
5. Comparaison des temperatures interieures du bureau obtenues dans la ville de adrar zone E5:	67
6. Comparaison des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « A » : ...	69
Conclusion générale.....	78
Références bibliographiques.....	81

Liste de figure

Figure.1 : toiture végétalisée.....	05
-------------------------------------	----

Figure.2 : mur trombe.....	05
Figure.3 : effet de cheminée.....	06
Figure.4: Climatisation Classique.....	06
Figure.5: pompe à chaleur réversible.....	07
Figure.6 :Rafraîchissement Adiabatique Indirect	07
Figure.7 : système de géocooling.....	08
Figure.8 : Systèmes Radiants Actifs	08
Figure.9 : plafond radiant.....	09
Figure.10 : L'échange thermique dans le plafond radiant.....	09
Figure.11: refroidissement par rayonnement.....	10
Figure.12: le rayonnement thermique.....	11
Figure.13: L'effet du convection.....	11
Figure.14: plafond radiant.....	12
Figure.16 : plan du bureau.....	20
Figure.17 : Zone climatique de l'Algérie selon l'APRUE.....	22
Figure.18: panneaux rayonnants.....	25
Figure.19: mur double brique.....	26
Figure.20: mur isolé.....	26
Figure.21 : mur à forte inertie (mur lourd).....	27
Figure.22 : comparaison des température du bureau digitalisées et simulées avec les nattes capillaires.....	30
Figure.23 : comparaison des température du bureau digitalisées et simulées avec panneau de plafond radiant.....	31
Figure 24: comparaison des températures ambiantes obtenues et digitalisées pour la ville de lyon.....	32
Figure 25 Variation de la température de bureau avec mur type « A » à Bejaia	33
Figure 26 Variation de la température de bureau avec mur type A a Mechria.....	34

Figure 28 Variation de la température de bureau avec mur type A a Ghardaïa.....	35
Figure 27 Variation de la température de bureau avec mur type A a Adrar	35
Figure 29 Variation de la température de bureau avec mur type A a Ouargla.....	36
Figure 30 La variation de la température de bureau en mur type « B » BEJAIA.....	37
Figure 31 Variation de la température de bureau avec mur type « B » à MECHRIA.....	38
Figure 32 Variation de la température de bureau avec mur type « B » à OUERGLA.....	39
Figure 33 Variation de la température de bureau avec mur type B a ADRAR.....	39
Figure 34 Variation de la température de bureau avec mur type B A GHARDAIA.....	40
Figure 35 Variation de la température de bureau avec mur type C a Bejaia	41
Figure 36 Variation de la température de bureau avec mur type « C » à MECHRIA.....	42
Figure 37 Variation de la température de bureau avec mur type C a Adrar.....	43
Figure 38 Variation de la température de bureau avec mur type C a Ouargla.....	43
Figure 39 Variation de la température de bureau avec mur type C a Ghardaya	44
Figure 40 variation de température de bureau a Bejaia pour les 3 types de mur avec et sans rafraichissement.....	45
Figure41 Variation de température de bureau a mechria pour les 3 types de mur avec et sans rafraichissement.....	47
Figure 42 variation de température de bureau a ouargla pour les 3 types de murs avec et sans rafraichissement.....	48
Figure 43 Comparaison des températures intérieures du bureau obtenues dans la ville de adrar zone E5.....	49
Figure 44 comparaison des résultats pour toutes les villes pour le mur type « A ».....	52
Figure 45 : Comparaison des résultats pour toutes les villes avec le mur type « B ».....	53
Figure 46 : comparaison des résultats pour toutes les villes avec le mur type « C ».....	55

Liste de tableau

Tableau.1 : caractéristique et avantage du plafond radiant.....	10
Tableau.2 : les caractéristiques thermo-physique des matériaux utilisés.....	22
Tableau.3 : présentation des différentes wilayas sélectionnées pour notre projet.....	23
Tableau. 4 : Données météorologiques pour chaque ville sélectionnée.....	23
Tableau.5 : caractéristique thermo-physique des matériaux utilisées.....	27
Tableau 6 : les caractéristiques des matériaux de construction du bureau de T. Catalina.....	30
Tableau 07 : Résultat obtenu.....	51
Tableau 08 : Comparaison des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « A »	51
Tableau 09 : Comparaison des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « B»..	53
Tableau 10 : Comparaison des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « C »..	54

Introduction générale

Introduction générale :

Ces dernières années on assiste à une explosion démographique et une urbanisation croissante marqué par une grande consommation énergétique surtout dans le secteur du bâtiment aussi une industrialisation polluante avec une quantité de gaz à effet de serre importante dégagée dans l'air. Cela a induit à des bouleversements climatiques où on assiste à des épisodes caniculaires dans le monde. En Aout 2003, on a déploré la mort de plus de 70 000 personnes suite à une vague de chaleur sans précédente qui a touché l'Europe. (Revue Médicale Suisse – www.revmed.ch – 4 avril 2007).

Dans un contexte mondial marqué par une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux et énergétiques et quelques fois sanitaires, la recherche de solutions durables pour le confort thermique des bâtiments est devenue une priorité. La climatisation, bien qu'indispensable dans de nombreuses régions, est souvent pointée du doigt pour son impact environnemental significatif. En effet, elle contribue à l'effet de serre, non seulement par les émissions directes de fluides frigorigènes, mais aussi indirectement par la consommation d'énergie issue de sources fossiles. Avec plus de 30 % de l'énergie consommée dans les bâtiments attribuée à la climatisation, il est urgent de repenser les systèmes de refroidissement pour les rendre plus efficaces et moins polluants

Les systèmes de climatisation traditionnel dit (HVAC), bien qu'efficaces, présentent des limites tant sur le plan énergétique qu'environnemental : consommation excessive d'électricité, recours à des fluides frigorigènes à fort potentiel de réchauffement climatique, nuisances sonores, volume important des machines et un impact sur la qualité de l'air intérieur (mouvement de l'air dû à une convection forcée). Ces contraintes ont poussé les chercheurs, ingénieurs et responsable industriels à trouver des solutions plus durables, silencieuses et économes en énergie et offrant le confort thermique adéquat.

L'Algérie n'est pas épargné par ce genre de phénomène, car elle est frappée depuis quelques temps par des épisodes caniculaires importantes avec des semaines caniculaires plus longues et des températures plus grandes quelques fois qui dépassent les 50°C, surtout dans les régions du sud où le climat est sec et aride forçant les habitants à une utilisation massive des systèmes de climatisation.

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

Notant que l'Algérie est un pays vaste de par sa surface avec des conditions climatiques propres à chaque région passant des régions côtières avec un climat tempéré, les hauts plateaux avec un climat semi-aride pour arriver au sud avec un climat va de sec et aride à un climat saharien.

Les systèmes tels que le plafond radiant hydraulique peuvent répondre à cette problématique, en réduisant la température intérieure des constructions et offrir un bon confort thermique avec une faible consommation énergétique.

Notre travail porte sur l'évaluation de la performance des plafonds rafraîchissants comme solution innovante pour le refroidissement des bâtiments. Ces systèmes, basés sur le rayonnement thermique, permettent d'abaisser la température intérieure en utilisant l'eau comme fluide caloporteur circulant dans des tuyaux intégrés au plafond. Ils présentent de nombreux avantages, notamment en termes de confort thermique, d'efficacité énergétique, et d'intégration architecturale.

L'objectif principal de ce mémoire est de modéliser et analyser le comportement thermique d'un local comportant un plafond rafraîchissant dans les différentes zones climatiques algériennes, en s'appuyant sur le logiciel de simulation énergétique TRNSYS. L'étude portera également sur l'influence des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment (matériaux de construction) et des conditions de fonctionnement du système (température et débit de l'eau).

À travers cette approche, nous chercherons à :

- Évaluer l'impact des plafonds rafraîchissants sur la température intérieure selon la région.
- Comparer les performances thermiques selon différents matériaux de construction.
- Proposer des configurations optimales adaptées aux réalités climatiques locales.

Ce travail se veut une contribution à la promotion des techniques de rafraîchissement passif et semi-actif en milieu aride et semi-aride, dans une optique de construction durable, d'efficacité énergétique et de réduction de l'empreinte carbone du secteur du bâtiment en Algérie.

Références insérées

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

1. Robine, J.M., Cheung, S.L.K., Le Roy, S. et al. (2008). *Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003*. C.R. Biologies, DOI:10.1016/j.crv.2007.12.001
2. IEA (2022). *Energy Efficiency Report*. <https://www.iea.org>
3. ADEME. *Climatisation et fluides frigorigènes – Impact environnemental*. <https://librairie.ademe.fr>
4. ASHRAE Handbook. *HVAC Systems and Equipment*.
5. ISO 11855-1:2012. *Building environment design – Embedded radiant heating and cooling*.
6. ONM Algérie. *Données climatiques régionales* – <https://www.meteo.dz>
7. APRUE. *Zones climatiques algériennes selon l'APRUE* – <http://www.aprue.org.dz>
8. Mahmoudche W. F., et al. (2025). *Étude TRNSYS sur le plafond radiant en climat désertique*.
9. Catalina, T., Virgone, J. (2010). *Evaluation of radiant ceiling cooling systems using TRNSYS*. Building and Environment. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.05.012
10. IPCC (2021). *Climate Change: Mitigation of Climate Change. Sixth Assessment Report*.

Chapitre 1 :

Etude bibliographique

1.Introduction :

Répondre au besoin de rafraîchissement dans le secteur du bâtiment devient impératif. Les systèmes (HVAC) sont les plus répondu. Malheureusement ce sont des systèmes à forte consommation énergétique présentant un certain inconfort à cause du mouvement d'air ressenti. Un paramètre qui a eu un impact important durant la dernière pandémie de la covid-19, où le virus s'est propageait à cause des systèmes de ventilation et centrale de traitement d'air qui récupère l'air d'un espace et le transporte à un autre après traitement, pour cela le plafond rafraichissant présente une bonne alternative, qui offre un meilleur confort thermique en éliminant le mouvement d'air réduisant le risque de maladie avec une réduction de la consommation énergétique.

2.Le Rafraîchissement des Bâtiments :

Le rafraîchissement d'un bâtiment repose sur des techniques passives (sans énergie) et systèmes actifs (basse consommation) pour maintenir un confort thermique en été, tout en réduisant la dépendance à la climatisation.

2.1. Objectifs :

- Améliorer le confort thermique en été
- Réduire la consommation énergétique
- Préserver la santé des occupants • Lutter contre les îlots de chaleur urbains

2.2. Rafraîchissement Passif (Zéro Énergie) :

Le rafraîchissement passif désigne l'ensemble des techniques architecturales, constructives et naturelles visant à réguler la température intérieure d'un bâtiment sans recours à des systèmes mécaniques énergivores. En exploitant les principes physiques de :

2.2.1. Protection Solaire & Ombre Naturelle :

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

- Brise-soleil (lames horizontales/verticales) pour bloquer le soleil.
- Stores extérieurs, volets, pergolas (plus efficaces qu'à l'intérieur).
- Végétation :
 - Arbres à feuilles caduques (ombre l'été, lumière l'hiver).
 - Toitures & murs végétalisés (évapotranspiration rafraîchissante).

2.2.2. Inertie Thermique & Ventilation Nocturne :

- Matériaux lourds (béton, pierre, terre) absorbent la chaleur le jour et la restituent la nuit.
- Ouvrir les fenêtres la nuit pour évacuer la chaleur accumulée.

2.2.3. Réflexion de la Chaleur :

Couleurs claires (toits blancs, murs réfléchissants).

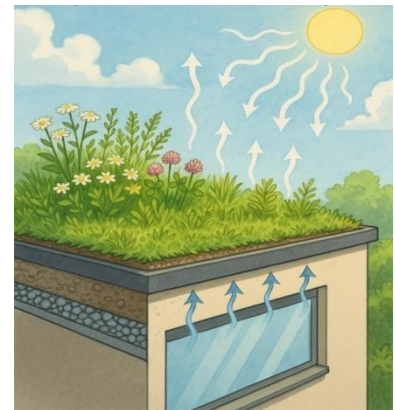
Revêtements "cool roof" (réduisent l'absorption thermique).

2.3. Exemples d'Applications :

Toitures végétalisées (évapotranspiration)

Les toitures végétalisées, aussi appelées toits verts, sont des systèmes d'aménagement de toiture sur lesquels on installe une couche de végétation vivante. Elles consistent à recouvrir tout ou une partie d'un toit avec un substrat (terre ou autre matériau de culture) et des plantes adaptées. Il y a deux types de toitures végétalisées, extensive et intensive, parmi ces avantages la réduction des îlots de chaleur urbains, Esthétique et intégration paysagère

Figure.1 : toiture végétalisée.



Murs trombe (déphasage thermique)

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

Le mur Trombe est un système passif de chauffage solaire utilisé en architecture bioclimatique. Il permet de récupérer la chaleur solaire et de la diffuser progressivement à l'intérieur du bâtiment grâce au principe de déphasage thermique. Il est composé de vitrage extérieure, couche d'air, mur massif, ouverture basses et hautes il fonctionne avec le déphasage thermique, parmi ces avantages la réduction des besoins en chauffage, durable et peu coûteux en entretien.

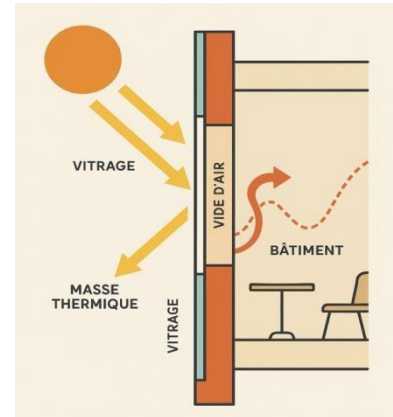


Figure.2 : mur trombe.

Chimney effect (tirage thermique naturel)

Le "chimney effect", ou effet de cheminée (en français tirage thermique naturel), est un phénomène physique de convection naturelle qui se produit lorsque de l'air chaud s'élève dans un espace vertical (comme une cheminée, une cage d'escalier, un puits de lumière ou une tour de ventilation), créant ainsi un mouvement d'air ascendant. Ce phénomène naturel peut être exploité pour ventiler un bâtiment sans énergie mécanique. Parmi ces avantages il peut fonctionner **24h/24** si bien conçu (même la nuit avec l'inertie thermique).



Figure.3 : effet de cheminée.

3.Rafraîchissement Actif :

Le rafraîchissement actif désigne l'ensemble des systèmes mécaniques et électromécaniques conçus pour réguler la température intérieure d'un bâtiment en utilisant une source d'énergie externe. Contrairement aux solutions passives, ces systèmes requièrent une consommation énergétique pour fonctionner, mais intègrent des technologies modernes pour optimiser leur efficacité.

4.Technologies Clés du Rafraîchissement Actif :

4.1. Systèmes à Compression (Climatisation Classique) :

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

Fonctionnement : Utilisation d'un fluide frigorigène dans un cycle compression/détente.

Type : Split-system (unités intérieures + extérieures)

Centralisés (systèmes VRV/VRF pour grands bâtiments)



Figure.4: Climatisation Classique.

4.2.Pompes à Chaleur Réversibles :

Principe : Fonctionnement en mode "froid" par inversion du cycle thermodynamique.

Avantage : Efficacité énergétique élevée ($COP > 3,5$ pour les modèles hautes performances)



Figure.5: pompe à chaleur réversible.

4.3. Rafraîchissement Adiabatique Indirect ;

Processus : Refroidissement de l'air via échangeur de chaleur + évaporation d'eau (sans ajout d'humidité dans l'air intérieur).

Performance : Efficace en climat sec (baisse de 5 à 10°C possible).

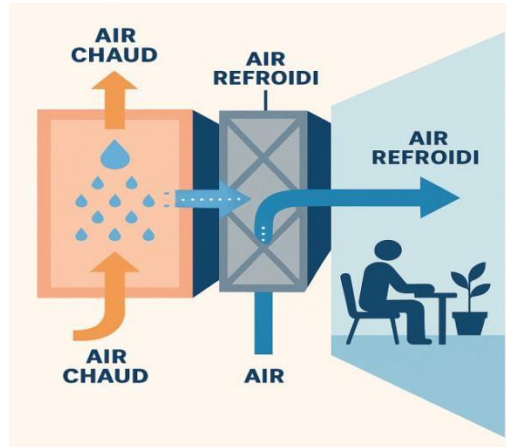


Figure.6 :Rafraîchissement Adiabatique Indirect

4.4.Géo-cooling (Échange avec le Sol) :

Technique : Utilisation de la température stable du sol (~12-15°C) via :

Puits canadien hydraulique (échangeur eau-glycol)

Sondes géothermiques verticales couplées à une PAC.

Avantage : Réduction jusqu'à 50% de la consommation vs climatisation traditionnelle.

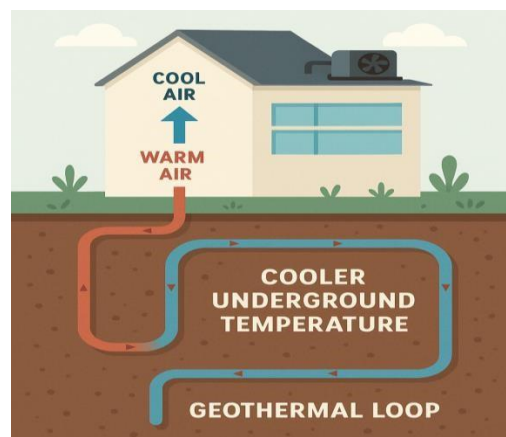


Figure.7 : système de géocooling.

4.5. Systèmes Radiants Actifs :

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

Méthode : Refroidissement par surfaces (plancher/plafond) avec eau glycolée à 16-19°C.

Avantage : Confort homogène sans courant d'air (idéal pour les bâtiments basse consommation).

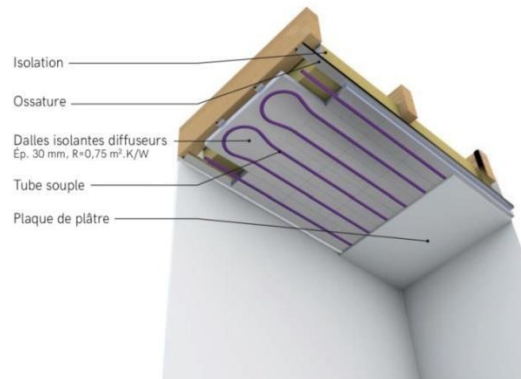


Figure.8 : Systèmes Radiants Actifs

5.Plafond Radiant :

Le plafond radiant est un système qui répond aux besoins de chauffage et/ou de rafraîchissement qu'on intègre au plafond. Il fonctionne principalement par rayonnement thermique, il est constitué d'une tuyauterie dans laquelle circule un fluide caloporteur (dans notre cas l'eau).

On appelle ce genre de système (système hydraulique) où des résistances électriques (dans un système électrique), permettent de chauffer ou de rafraîchir une pièce sans ventilation mécanique directe



Figure.9 : plafond radiant.

5.1.Fonctionnement :

En chauffage : le plafond émet des rayonnements infrarouges qui réchauffent les personnes, murs et objets, créant une sensation de chaleur douce et homogène.

En rafraîchissement : la surface apparente du plafond absorbe la chaleur de la pièce par principe d'échange thermique (par convection et rayonnement), abaissant ainsi la température de l'air qui sera en contact avec le plafond rafraîchi. L'air refroidi descendra à faible vitesse par effet de gravité à la zone d'occupation. On note que le phénomène de condensation est un inconvénient majeur pour ce système.

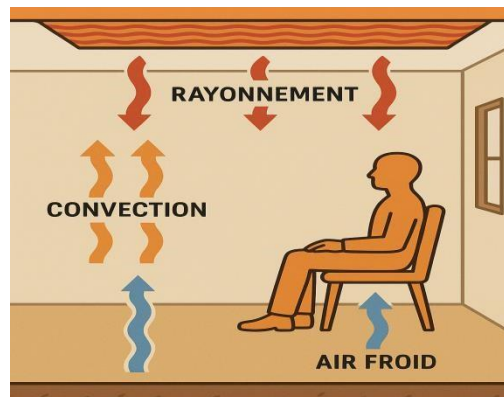


Figure.10 : L'échange thermique dans le plafond radiant.

5.2.Caractéristiques principales :

Ce tableau présente les caractéristiques et les avantages de notre système :

Tableau.1 : caractéristiques et avantages du plafond radiant.

Caractéristiques	Avantages
------------------	-----------

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

Chauffe ou refroidit par rayonnement	Confort thermique naturel
Silencieux, sans ventilateur	Idéal pour bureaux, chambres
Invisible (intégré au plafond)	Esthétique préservée
Faible inertie thermique (selon matériau)	Réponse rapide.

5.3. Description du système :

Les plafonds rafraîchissants, également appelés systèmes de refroidissement radiant, fonctionnent selon un principe combinant rayonnement thermique et convection naturelle pour assurer un confort thermique optimal tout en réduisant la consommation d'énergie. Leur fonctionnement repose sur la circulation d'eau froide (généralement entre 16 et 19°C) dans des tubes ou des nattes capillaires intégrées dans le plafond. Cette eau absorbe la chaleur de la surface du plafond, qui devient ainsi une surface froide. Par rayonnement infrarouge, cette surface froide absorbe la chaleur des occupants et des objets présents dans la pièce, créant une sensation de fraîcheur similaire à celle ressentie lors d'une nuit étoilée. En parallèle, l'air chaud en contact avec la surface froide du plafond se refroidit et descend lentement vers le sol par convection naturelle, assurant une circulation d'air uniforme et évitant les courants d'air désagréables.

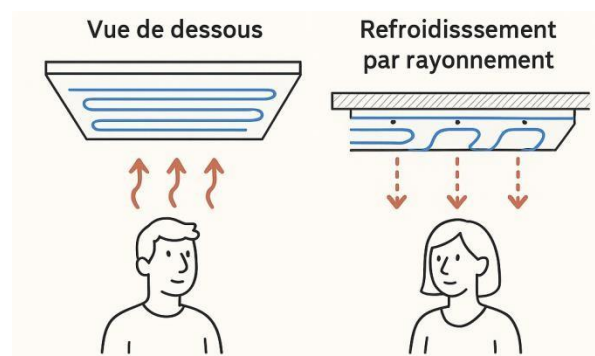


Figure.11: refroidissement par rayonnement.

Le rayonnement thermique est un processus clé dans ces systèmes. La surface froide du plafond émet un rayonnement qui traverse l'air sans le chauffer et est absorbé par les surfaces plus chaudes, comme les murs, les meubles et les occupants. Cela permet un échange de

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

chaleur direct entre le plafond et les personnes présentes dans la pièce, créant une sensation de fraîcheur sans nécessiter de refroidissement excessif de l'air ambiant. En complément, la convection naturelle joue un rôle important : l'air chaud, en contact avec la surface froide du plafond, se refroidit et redescend lentement vers le sol, formant une boucle de circulation d'air naturelle. Ce processus silencieux et efficace élimine les points chauds et assure une répartition uniforme de la fraîcheur dans toute la pièce.

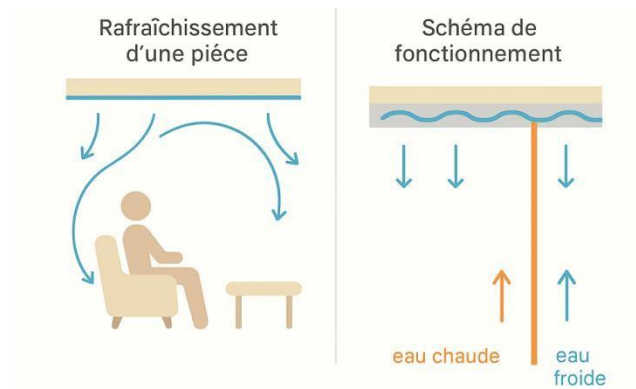


Figure.12: le rayonnement thermique.

La régulation de la température est un autre aspect essentiel de ces systèmes. La température de l'eau circulant dans les tubes ou les nattes capillaires peut être ajustée en fonction des besoins de refroidissement, et le débit d'eau peut être modulé pour optimiser l'efficacité énergétique. Des capteurs de température et d'humidité permettent un contrôle précis, ajustant automatiquement les paramètres en fonction des conditions intérieures et extérieures. Cependant, un défi majeur des plafonds rafraîchissants est la gestion de l'humidité, car la surface froide du plafond peut provoquer de la condensation si la température de l'eau descend en dessous du point de rosée de l'air ambiant. Pour éviter ce problème, la température de l'eau est généralement maintenue entre 16 et 19°C, et dans les environnements très humides, un système de déshumidification complémentaire peut être nécessaire.

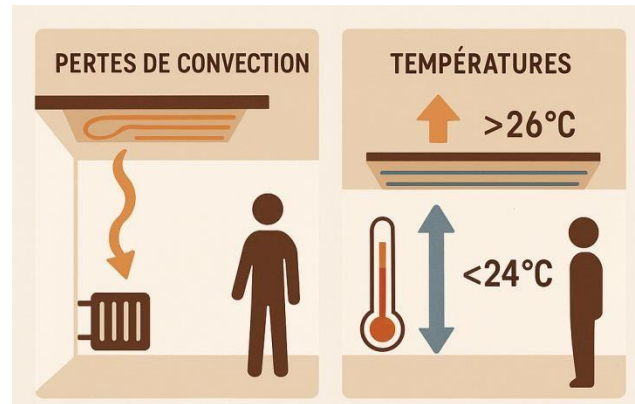


Figure.13: L'effet du convection.

En comparaison avec les systèmes de climatisation traditionnels, les plafonds rafraîchissants offrent une solution plus économe en énergie, plus silencieuse et plus confortable. Ils évitent les courants d'air et les variations de température, tout en améliorant la qualité de l'air intérieur en réduisant la circulation de poussières et de bactéries. Ces systèmes sont particulièrement adaptés aux bureaux, aux bâtiments résidentiels, aux établissements de santé et aux espaces commerciaux, où ils assurent un refroidissement uniforme et discret.

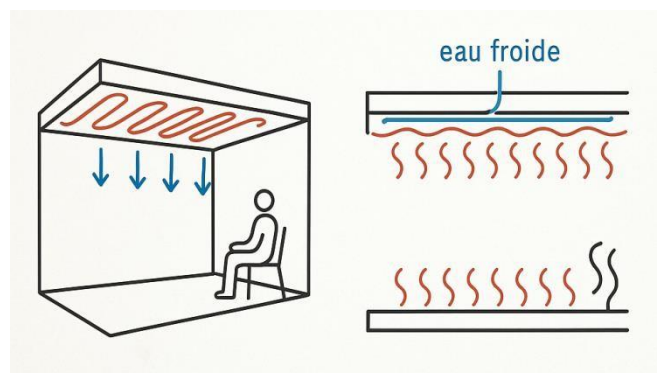


Figure.14: plafond radiant.

6. Etat de l'art :

Il existe plusieurs chercheurs qui ont étudié le plafond radiant rafraîchissant ou chauffant, certains concernent l'impact du plafond radiant sur le confort thermique, d'autres sur les coefficients de rayonnement, de convection et total, aussi des travaux sur les nouveaux panneaux plus efficaces et plus esthétiques. On a :

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

en 1999, Takehito Imanari et all ont fait une étude qui compare le système de panneaux rayonnants au plafond avec les systèmes de climatisation traditionnels à air pulsé en termes de confort thermique, consommation énergétique et coûts. Les résultats montrent que le système de panneaux rayonnants crée un environnement plus confortable avec une variation verticale de température réduite et moins de courants d'air, particulièrement apprécié par les occupants féminins. Grâce au transfert de chaleur par rayonnement, le volume d'air pulsé nécessaire est diminué, réduisant ainsi la consommation énergétique liée au transport d'air de 20 % et la consommation totale d'énergie de 10 %. Les simulations indiquent un temps de retour sur investissement variant de 1 à 17 ans selon le prix des panneaux. Cependant, des défis persistent, comme le contrôle de l'humidité pour éviter la condensation et l'intégration architecturale des panneaux. Ces conclusions pourraient s'appliquer à des régions aux climats similaires, comme l'Asie du Sud-Est ou le sud des États-Unis

En 2010, T. Catalina a présente une étude approfondie sur les performances thermiques et le confort thermique procuré par un plafond rafraîchissant par rayonnement. En combinant des simulations dynamiques (avec le logiciel TRNSYS) et des essais expérimentaux dans une cellule test nommée Minibat, l'étude démontre que ce système assure un confort thermique équivalent, voire supérieur, à celui des systèmes de climatisation traditionnels. Les résultats montrent une asymétrie verticale de température inférieure à 1,2°C et un indice PMV conforme aux standards de confort. Le plafond rafraîchissant permet une réduction de la consommation énergétique de 21,5 % tout en évitant les mouvements d'air désagréables. Grâce à un système de régulation adapté, le risque de condensation est évité même en conditions chaudes et humides. Ce système constitue ainsi une solution efficace, silencieuse et éco énergétique pour le refroidissement des bâtiments, particulièrement pertinente dans les constructions légères ou préfabriquées.

En 2010, en chine Ma Li and all présentent le développement et l'évaluation expérimentale estivale d'un nouveau panneau radiant de plafond pour le rafraichissement. Ce système vise à résoudre deux problèmes majeurs des panneaux radiants classiques utilisés en été : la capacité de refroidissement limitée due à la température relativement élevée de l'eau, et la formation de condensation. Le nouveau concept intègre une conception monobloc entre le panneau et les conduites d'eau, éliminant ainsi la résistance thermique de contact. Le panneau est incliné pour

faciliter l'évacuation de l'eau condensée via des rigoles intégrées et des conduites de drainage. Les essais réalisés dans une pièce expérimentale ont démontré que ce nouveau panneau présente une capacité de refroidissement nettement supérieure, atteignant jusqu'à 1000 W/m^2 , comparé aux $80\text{--}120 \text{ W/m}^2$ des panneaux classiques. De plus, le système de gestion de la condensation s'est avéré efficace, empêchant l'accumulation d'eau sur les surfaces. Les résultats montrent également que l'influence de l'air neuf sur le transfert thermique est négligeable à basse vitesse ($< 2 \text{ m/s}$), et que la condensation est mieux contrôlée lorsque l'eau d'alimentation est à 10°C plutôt qu'à 7°C . Ce nouveau panneau radiant constitue une solution prometteuse pour les applications de climatisation éco énergétique, offrant à la fois performance thermique élevée et gestion efficace de la condensation.

En février 2012 Manuel Andrés-Chicote et all ont fait une étude expérimentale qui évalue les performances thermiques d'un système de plafond radiant rafraichissant dans une chambre climatique contrôlée. Les résultats démontrent que le transfert thermique s'effectue principalement par rayonnement (50-66% du flux total), avec un coefficient constant de $5,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, tandis que la composante convective présente une variabilité plus importante ($4,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en moyenne). Contrairement aux prédictions de la norme EN 15377-1, les mesures indiquent des capacités de refroidissement inférieures, révélant ainsi les limites des modèles basés uniquement sur la température opérative. Ces travaux soulignent la nécessité de considérer séparément les mécanismes de rayonnement et de convection pour une conception optimale des systèmes radiants, permettant d'améliorer à la fois leur efficacité énergétique et le confort thermique dans les bâtiments. Les conclusions offrent des perspectives importantes pour le développement de solutions durables en climatisation.

En 2014, Rongling Li and all, ont évalué les performances en conditions réelles d'un système de panneau rayonnant de chauffage/refroidissement installés au plafond dans un bâtiment expérimental à faible consommation énergétique de l'Université de Tokyo (21KOMCEE). L'objectif est de combler l'absence de normes et de bases de données de référence pour ce type de système, tout en fournissant des données utiles pour des projets similaires. L'évaluation repose sur des mesures in situ du flux thermique, de l'efficacité énergétique et du confort thermique. Les résultats montrent que le coefficient global de transfert thermique est de $3,7 \text{ W/}$

($\text{m}^2 \cdot \text{K}$) en mode chauffage et de $4,8 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ en mode rafraîchissement. Cependant, une part significative de la chaleur (30–40 %) est perdue vers le plénum situé au-dessus des panneaux, représentant une perte d'énergie notable. Des propositions d'amélioration sont formulées, notamment l'amélioration de l'isolation au-dessus des panneaux et l'utilisation du plénum comme conduit d'air pour réintroduire la chaleur dans la pièce. Sur le plan du confort thermique, les résultats indiquent que le système permet d'atteindre un environnement de catégorie B selon la norme ISO 7730, avec une température ambiante uniforme, une faible stratification verticale de la température et une humidité contrôlée sans condensation. L'étude confirme la pertinence du modèle de résistance thermique recommandé par la norme ISO 11855-2 pour l'évaluation de ces systèmes, tout en soulignant la nécessité de capteurs très précis lorsque la différence de température est faible.

En 2017, Tomasz Cholewa and all ont fait un article qui présente une étude expérimentale sur les coefficients de transfert de chaleur entre un plafond radiant chauffé/refroidi et une pièce, réalisée dans une chambre climatique. Les auteurs mesurent directement les flux de chaleur émis par le plafond radiant plutôt que de se baser sur la chaleur fournie au système, ce qui permet d'obtenir des résultats plus précis. Les coefficients de transfert convectif, radiatif et total sont analysés pour différentes températures de surface et modes (chauffage/refroidissement). Les résultats montrent que les coefficients de transfert convectif pour un plafond chauffé sont négligeables, tandis que ceux pour un plafond refroidi sont sous-estimés dans la littérature. Les coefficients de transfert total et radiatif sont également réévalués, avec des recommandations pour les concepteurs : par exemple, utiliser un coefficient radiatif de $5,5 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$ pour le chauffage et $5,2 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$ pour le refroidissement. L'étude souligne l'importance de choisir une température de référence adaptée (selon la position assise ou debout) et explore l'impact d'une faible émissivité de surface (à l'aide d'une feuille d'aluminium) sur les transferts thermiques.

En 2018, Mi Su Shin and all ont fait une étude des systèmes de panneaux de plafond radiant froid (CRCP) qui sont de plus en plus utilisés dans les bâtiments modernes en raison de leur confort thermique élevé, de leur potentiel de réduction de la consommation énergétique et de leur intégration architecturale. Traditionnellement, la capacité de refroidissement des

CRCP est évaluée pour des installations de type fermé, où la surface du plafond est entièrement couverte par des panneaux. Cependant, peu d'études ont examiné les performances des CRCP de type ouvert, qui incluent des ouvertures entre les panneaux. Cette étude vise à vérifier l'hypothèse selon laquelle les CRCP de type ouvert améliorent la capacité de refroidissement en utilisant l'air refroidi du plénum qui circule à travers les ouvertures. Les CRCP de type ouvert offrent une capacité de refroidissement nominale de 54 à 80 % plus élevée (moyenne de 64 %) que les CRCP de type fermé. L'augmentation de la capacité est attribuée à l'air refroidi du plénum qui descend dans la zone occupée, améliorant ainsi les transferts de chaleur convectifs. Une surface d'ouverture plus grande et une disposition distribuée des panneaux améliorent davantage la capacité de refroidissement. La capacité de refroidissement peut être modélisée par une fonction puissance de la différence de température entre la pièce et l'eau froide : $q = k(\theta_{op} - \theta_w)^n$, où k et n sont des coefficients dépendants de la configuration des panneaux.

Paolo Valdiserri et al ont fait une simulation en octobre 2020 qui examine les performances et le confort thermique dans une chambre d'hôpital équipée de panneaux rayonnants au plafond (RCP), intégrés à un système de climatisation. Les auteurs ont mené une campagne de surveillance microclimatique sur une semaine dans une chambre de maternité de l'hôpital Maggiore de Bologne (Italie), révélant un inconfort thermique lié à des températures intérieures élevées (24,4 °C en moyenne) et une faible humidité relative (37 %). Les données expérimentales ont permis de calibrer un modèle de simulation énergétique dynamique (TRNSYS) pour analyser différentes températures d'air entrant. Les résultats montrent que le meilleur confort thermique (PMV proche de 0) est obtenu avec une température d'air neutre (22 °C), tout en réduisant la consommation énergétique. L'étude souligne l'importance d'une régulation optimale des systèmes hybrides dans les établissements de santé pour concilier efficacité énergétique et confort des patients.

En 2020, Janusz Wojtkowiak and al Etudient l'effet de la corrugation de surface sur la capacité de refroidissement des panneaux de plafond, en analysant théoriquement et expérimentalement l'influence de la longueur de corrugation L (30 à 120 mm) et de l'angle de corrugation β (30° à

180°). Les résultats montrent que la corrugation peut augmenter significativement la puissance de refroidissement, avec une amélioration allant jusqu'à 90 % pour $L=30$ mm et $\beta=30^\circ$ par rapport à un panneau plat, atteignant 121 W/m². Pour des configurations plus pratiques ($L=40$ mm, $\beta=90^\circ$), l'augmentation est de 15 à 20 %. L'étude met en évidence trois mécanismes clés : l'augmentation de la surface d'échange, la réduction de l'épaisseur de la couche limite et une meilleure évacuation de l'air. Bien que le panneau corrugué présente des avantages en termes d'efficacité énergétique et de confort thermique, des questions pratiques comme le nettoyage et l'esthétique doivent être considérées. Les auteurs suggèrent des recherches supplémentaires pour optimiser la forme de la corrugation et valider la méthode de calcul pour d'autres configurations.

En 2021, Ali Radwan and all, proposent une nouvelle conception de panneau de rafraîchissement radiant de plafond basé sur des mini-canaux multi-segmentés, visant à surclasser les performances des panneaux traditionnels à plaques et tubes. Cette conception innovante divise le panneau en segments inclinés permettant d'accroître la surface d'échange thermique sans augmenter l'emprise au plafond, favorisant ainsi un refroidissement plus uniforme, une meilleure capacité de refroidissement et une consommation énergétique réduite. Deux modèles CFD 3D ont été développés, l'un pour analyser la performance thermo-hydraulique et l'autre pour simuler l'intégration du panneau dans des environnements réels. Les résultats ont démontré que les panneaux en mini-canaux offrent une meilleure uniformité thermique, un meilleur confort intérieur (PMV et PPD améliorés), et jusqu'à 51 % d'augmentation de la capacité de refroidissement dans le cas de la configuration en zigzag (+83 % de surface effective), tout en fonctionnant à une température de panneau plus élevée (18,8 °C contre 15,8 °C pour les systèmes conventionnels), ce qui réduit le risque de condensation. Le système propose également des configurations inclinées ($\pm 45^\circ$, 90° , zigzag) qui améliorent la distribution d'air et favorisent un refroidissement zoné, particulièrement efficace dans les espaces occupés.

En 2021, Minzhi Ye and all, présentent une analyse expérimentale des performances thermiques d'un nouveau panneau de plafond radiant rafraîchissant (CRCP) doté d'une surface concave et segmentée, conçu pour optimiser le transfert de chaleur et améliorer le confort

thermique intérieur. L'expérience a été réalisée dans une chambre climatique contrôlée, équipée de panneaux prototypes en aluminium à surface incurvée, développés par une entreprise japonaise. Seize essais ont été effectués en faisant varier la température d'entrée de l'eau (15–24 °C) et le débit (2–8 L/min). Les températures de l'air, les flux thermiques, et les températures de surface ont été mesurées et analysées. Les résultats montrent une baisse de la température d'entrée de 24 °C à 15 °C a entraîné une hausse de 50 % du flux thermique total. Le coefficient de transfert thermique radiatif est resté constant à 5 W/m²·K, tandis que le coefficient convectif variait de manière exponentielle selon l'écart de température entre l'air et le panneau. Par rapport aux panneaux plats classiques, le panneau concave a permis une augmentation de 45 % du flux thermique total avec une surface moindre que les panneaux à ailettes inclinées, tout en conservant une température de surface supérieure au point de rosée (donc sans condensation). La température intérieure restait uniforme verticalement (écart < 0,3 K entre tête et pieds). Le panneau atteint les mêmes performances avec des débits d'eau plus faibles.

En 2021, Dragos-Ioan Bogatu and all présentent une étude numérique approfondie de l'influence de différentes conceptions géométriques sur les performances thermiques d'un système de plafond rafraîchissant par rayonnement. À l'aide de la méthode des volumes finis et du logiciel ANSYS Fluent, ils modélisent et comparent plusieurs configurations de canalisations (en serpent, hélicoïdal, et autres) pour évaluer leur efficacité en matière de transfert de chaleur, de température de surface et de distribution du champ thermique. Les résultats montrent que la forme et la répartition des tubes influencent significativement l'uniformité du refroidissement et l'efficacité énergétique du système. En particulier, certaines configurations permettent d'optimiser l'homogénéité du champ thermique tout en réduisant les écarts de température à la surface du plafond. L'étude conclut que le choix de la géométrie de distribution des tubes est un paramètre clé dans la conception de plafonds rafraîchissants performants, tant en termes de confort que de rendement thermique.

en 2021, Daoming Xing and all analysent par simulation numérique l'impact de diverses configurations d'installation des plafonds rayonnants rafraîchissants sur la performance thermique et le confort dans un bureau type. À l'aide d'un modèle CFD 3D validé

expérimentalement, ils comparent plusieurs scénarios de disposition des panneaux (pleine couverture, partielle, avec ou sans obstacles) en évaluant des critères comme la température de l'air, l'indice PMV et la distribution du rayonnement. Les résultats montrent que la couverture totale du plafond offre les meilleures conditions de confort thermique, tandis que les configurations partielles peuvent entraîner des zones d'inconfort localisé. De plus, l'ajout d'obstacles (comme des luminaires suspendus) modifie sensiblement les échanges thermiques radiatifs. L'étude met en évidence l'importance du placement stratégique des panneaux pour optimiser à la fois l'efficacité énergétique et le confort thermique perçu.

En 2022, JUN SHINODA and all, ont fait cette étude qui propose une méthode améliorée pour mesurer la performance des panneaux rayonnants de plafond suspendus, en tenant compte de la température du plénum, souvent négligée dans les normes actuelles (EN 14240, ISO 18566-2). Les tests en chambre climatique ont révélé qu'une partie significative de la capacité de refroidissement des panneaux peut être absorbée par le plénum (jusqu'à 54 % sans isolation), réduisant ainsi l'efficacité dans la pièce. Une isolation des panneaux améliore cette répartition, mais jusqu'à 20 % de la capacité peut encore être perdue. La nouvelle méthode, intégrant un contrôle de la température du plénum, permet de prédire précisément le refroidissement utile dans la pièce grâce à un modèle empirique, validé par des mesures sur site (erreur moyenne de 6 %). Les auteurs recommandent d'inclure cette approche dans les normes pour éviter le sous-dimensionnement des systèmes et optimiser leur contrôle, notamment dans les configurations où le plénum est exposé à des sources de chaleur (éclairage, rayonnement solaire). Cette avancée est cruciale pour garantir l'efficacité énergétique des systèmes de refroidissement rayonnant dans les bâtiments.

Suite à la pandémie du covid-19, Goosang Joe et Sanghoon Park ont réalisé une étude 2023 pour estimer le confort thermique dans divers conditions intérieurs avec les apports de gains intérieurs et extérieurs le confort thermique dans la zone adjacente du plafond et le rendement thermique d'un panneau radiant chauffant. On a créé un modèle de simulation avec l'ajout des conditions optimales pour offrir un bon confort thermique y compris dans les zones en contact avec les murs extérieurs. Pour la modélisation on a utilisé une salle typique représentant un bureau à Seoul dans laquelle un panneau radiant chauffant a été installé et une

grande fenêtre a été intégrée, créant ainsi un risque d'inconfort important par la grandeur de l'ouvrant. Après plusieurs simulations, on peut dire qu'il existe un faible tirage thermique dans les zones d'occupations dû à la différence de température du panneau radiant et la surface de la fenêtre. L'augmentation de la température des panneaux radiant pourrait réduire le courant descendant, le choix de l'emplacement des panneaux rayonnants doit être fait avec soin en considérant les zones avoisinantes avec l'extérieures, aussi l'asymétrie radiante n'était pas importante ce qui a permis d'avoir un bon confort thermique.

en 2024, W. F. Mahmoudche and all ont évalué l'efficacité des plafonds radiants de type nattes capillaires pour le rafraîchissement d'une maison dans la région d'El-Oued, caractérisée par un climat caniculaire avec des températures estivales dépassant 50°C. L'objectif principal était d'analyser l'impact de ce système sur le confort thermique et les économies d'énergie. La modélisation a été faite avec TRNSYS en se concentrant sur le salon équipé de nattes capillaires

(surface de 15,18 m²). Les Paramètres étudiés sont l'effet de la température d'entrée de l'eau (14°C, 16°C, 18°C) et le débit (160, 180, 200 kg/h). Les résultats obtenus étaient satisfaisants, notant que la Température d'entrée de l'eau de 14°C a permis d'obtenir des températures intérieures optimales et satisfaisantes (26,6°C) contre 46,9°C à l'extérieur, soit une réduction de plus de 10°C. Les températures intérieures sans rafraîchissement atteignaient 40°C. Le rafraîchissement du salon a réduit la température d'une pièce adjacente non rafraîchie de 4°C (passant de 37,18°C à 33°C). L'impact du débit (160 à 200 kg/h) était négligeable comparé à celui de la température d'entrée de l'eau.

En 2025 W. F. Mahmoudche and all ont analysé théoriquement le comportement thermique d'un plafond rafraîchissant intégré dans un bureau administratif, et ce dans les cinq zones climatiques de l'Algérie définie par l'APRUE, en utilisant le logiciel de simulation TRNSYS 16. Le panneau rafraîchissant a permis de réduire la température intérieure de 6°C à 13°C, selon la zone. En zone désertique (E5, Ouargla), la température extérieure atteignait 49,11°C, mais la température intérieure est descendue à 31,5°C grâce au système. À Bejaïa (zone E1), la température intérieure est passée de 34,2°C à environ 27°C, démontrant une amélioration du confort thermique même dans les régions plus tempérées. La température de l'eau d'entrée

Chapitre 2 :**Présentation du cas d'étude**

s'est révélée cruciale : une température plus basse améliore le rafraîchissement, tant qu'elle reste au-dessus de la température de rosée pour éviter la condensation.

Chapitre 02 :

Présentation du cas d'étude

1. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE :**1.1 Introduction**

Pour ce travail on va présenter le bureau dans lequel plusieurs simulations ont été faites, ainsi que les différentes villes choisies pour les simulations, chaque ville représente une région et une zone climatique de l'Algérie. Notant que le territoire Algérien est vaste de par sa surface et diversifié dans son relief et son climat.

1.2 Description du bureau :

Le bureau est une pièce cubique spacieuse de 25 m² de surface avec une hauteur sous plafond de 5m. Une fenêtre de 1,8m au côté est. Une porte en bois permet l'accès à la pièce. Le bureau peut accueillir trois personnes avec deux postes de travail bien espacés avec un ordinateur pour chacun. Les murs sont en double brique espacé d'une lame d'air de 5cm et le plafond est une terrasse inaccessible constituée de 16cm d'hourdis et de 4cm dalle de compression.

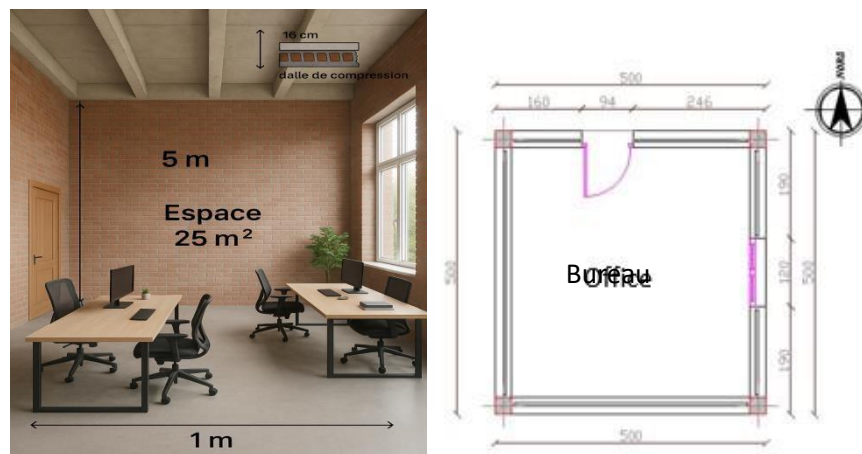


Figure.16 : plan du bureau.

1.1.2 Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux de constructions :

Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction sont les propriétés qui influencent le comportement thermique d'un bâtiment. Ces propriétés sont essentielles dans les simulations thermiques, notamment avec des logiciels comme **TRNSYS**, pour modéliser les échanges de chaleur dans les murs, toitures, planchers, etc.

Voici les principales caractéristiques thermo-physiques :

1.1.2.3 Conductivité thermique (λ) :

- Définition : capacité d'un matériau à conduire la chaleur.
- Unité : $\text{W/m}\cdot\text{K}$ (watt par mètre-kelvin).
- Plus λ est faible, plus le matériau est isolant.

1.1.2.4 Capacité thermique massique (c ou C_p)

- Définition : quantité de chaleur qu'un kilogramme de matériau peut stocker pour une variation de température de $1\text{ }^\circ\text{C}$.
- Unité : $\text{J/kg}\cdot\text{K}$

1.1.2.5 Densité (ρ)

- Définition : masse par unité de volume.
- Unité : kg/m^3

1.1.2.6 Diffusivité thermique (α)

- Définition : capacité du matériau à transmettre les variations de température.
- Formule :

$$\alpha = \lambda / \rho \cdot c$$

- Unité : m^2/s
- Plus α est faible, plus le matériau réagit lentement aux variations de température.

1.1.2.7 Effusivité thermique

- Définition : capacité d'un matériau à échanger de la chaleur avec son environnement.
- Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau « sent le froid » au toucher.

Chapitre 2 :

Présentation du cas d'étude

Le tableau suivant présente les caractéristiques thermo-physique des matériaux utilisés.

Tableau.2 : les caractéristiques thermo-physique des matériaux utilisés.

Matériau	λ (W/m·K)	c (J/kg·K)	ρ (kg/m ³)
Bois	0,15-0,25	1600-2100	700-900
Plâtre	0,25-0,35	1090	850-950
Hourdis	1,2-1,5	840	1400-2000
Liège	0,035-0,05	1800	100-200
mortier	0,7-1,4	1000	1700-2100
carrelage	0,85-1,3	800	2000-2200

1.3. Présentations des villes choisies :

Pour observer le comportement thermique de notre panneau rayonnant rafraichissant, nous avons choisi cinq villes représentant chacune une zone climatique de l'Algérie.

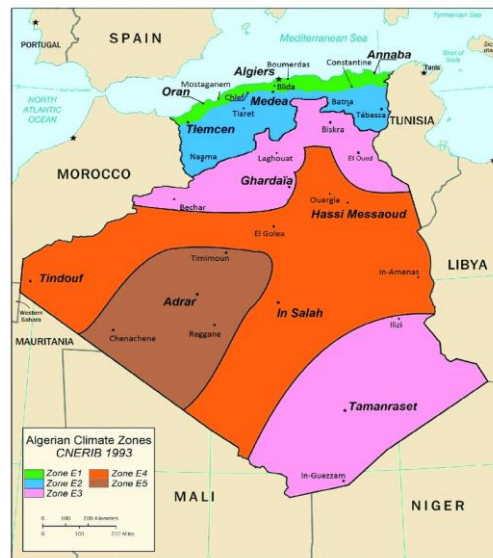


Figure.17 : Zone climatique de l'Algérie selon l'APRUE.

Les tableaux 3 et 4 présentent les données astronomiques et météorologiques des villes choisies pour ce travail :

Tableau.3 : présentation des différentes wilayas sélectionnées pour notre projet.

	Bejaïa	Mechria	Ghardaïa	Ouargla	Adrar
Zone	E1	E2	E3	E4	E5
Régions	Côtier	Hauts plateau	semi -sec	sec	Désertique
Altitude [m]	2	11.49	468	130	279
Latitude [°]	36.71	34.93	32.4	31	27.81
Longitude [°]	5.06	-0.43	3.8	5	-0.18

Tableau. 4 : Données météorologiques pour chaque ville sélectionnée.

	Bejaia	Mechria	Ghardaïa	Ouargla	Adrar
Température extérieure [°C]	25	29.4	34.9	36.4	36
Humidité %	73	26	19	20	14
Température de rosée [°C]	19.8	8.1	9.2	9.5	4.3

Chapitre 03 : Modélisation

1.Introduction :

Chapitre 3 :

Modélisation

Pour la partie de la modélisation, on va présenter le logiciel utilisé ainsi que les différents matériaux de construction utilisés, avec les différentes configurations des trois murs utilisés.

2.Présentation du modèle :

Pour la modélisation nous avons travaillé avec TRNSYS.16, en s'appuyant sur TRNBUILD, le type a-65 et Métronome 6 pour les données climatiques. Nous avons également opté pour le panneau rayonnant proposé dans la bibliothèque du logiciel, avec une légère modification de l'espacement entre les tuyaux, qui était de 10 cm dans notre cas. La température de l'eau à l'entrée utilisée est de 17°C avec un débit de 180 kg/h pour toutes les villes sauf pour la ville de Bejaïa où une température d'entrée de 21°C a été utilisée afin d'éviter la condensation.

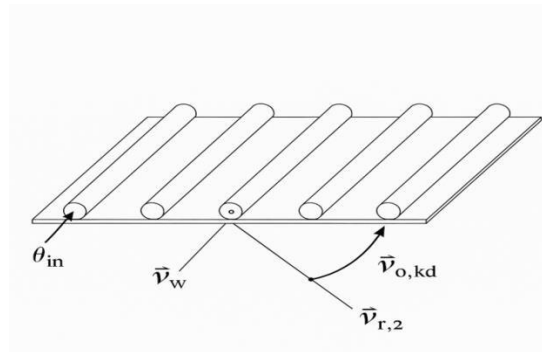


Figure.18: panneaux rayonnants

3.Les différentes configurations des murs utilisés

Notre travail consiste à voir le comportement thermique de notre panneau radiant rafraichissant dans les différentes villes choisies avec 3 types de murs :

3.1.Type A mur standard : double brique

séparé par 5cm de lame d'air.

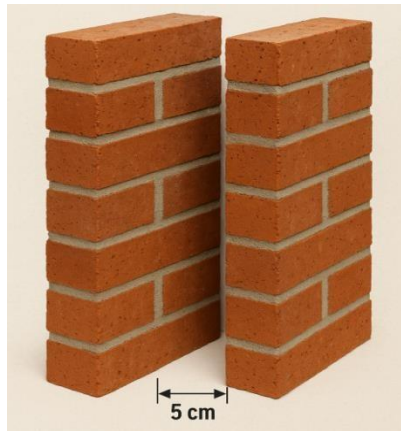


Figure.19: mur double brique.

3.2.Type B mur isolé : double brique séparé par 5cm

de polystyrène extrudé

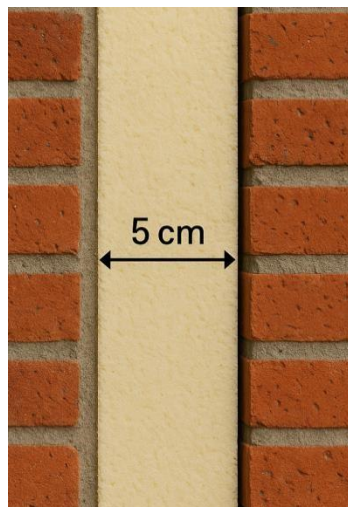


Figure.20: mur isolé

3.3.Type C mur lourd : mur en brique pleine de terre cuite

d'une épaisseur de 40cm.



Figure.21 : mur à forte inertie (mur lourd).

Le tableau suivant regroupe la caractéristique thermo-physique des matériaux choisis.

Tableau.5: Caractéristiques thermo-physique des matériaux utilisées.

Composant	Épaisseur	Conductivité thermique (λ)(W/m·K)	Capacité thermique (c)(J/kg·K)	Densité (ρ)(kg/m ³)
Brique creuse	10–15 cm	0,3 – 0,5	~840	1200 – 1400
Brique de terre cuite	40 cm	0,6 – 0,9	~840	1600 – 1800
Lame d'air (immobile)	5 cm	~0,024	—	—
Polystyrène extrudé	5cm	0,029 – 0,035 (très bon isolant)	~1400	30 – 45

4. Les hypothèses de nos simulations :

Les hypothèses de nos simulations sont :

Température du plafond uniforme.

Températures des parois et du plancher uniformes

Températures de l'air uniforme.

Les caractéristiques thermo-physiques sont considérées comme constantes :

$$M \cdot C_p \frac{dT_{ai}}{dt} = hcpa(T_{pl_{pl}} - T_{ai}) + \sum h_i A_i (T_i - T_{ai}) + Q_{appor} \quad (1)$$

Avec

$$Q_{appor} = Q_{solaires} + Q_{humain} + Q_{appareil} + Q_{renou\ d'air} \quad (2)$$

Et

$$Q_{renou\ d'air} = 0.34x q_v (T_{ai} - T_{ex}) \quad (3)$$

Chapitre 4

Résultat et interprétation

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

1. Validation des résultats :

On a comparé nos résultats avec ceux de T. Catalina, à travers une simulation d'un bureau préfabriqué de forme rectangulaire pour les 3 premiers jours de la semaine la plus chaude du mois de juillet dans la ville de Lyon en France.

1.1. La comparaison entre les températures intérieures du bureau rafraichis avec des panneaux de natte capillaire et le panneau de plafond radiant :

On a comparé les températures intérieures du bureau préfabriqué à Lyon, rafraichis avec les nattes capillaires pour la première comparaison et le panneau de plafond radiant pour la seconde.

La température d'entrée de l'eau utilisée est de 16°C et le débit de 180kg/h et ceci pour les deux systèmes.

Le tableau suivant présente les caractéristiques des matériaux de construction du bureau de T. Catalina.

Tableau 6 : les caractéristiques des matériaux de construction du bureau de T. Catalina.

Matériau	λ (W/m·K)	Epaisseur (mm)	ρ (kg/m ³)
Bois	0.136	25	544
Plâtre	0,35	10	817
béton	0,16	200	400
matériau isolant	0,06	50	200

1.2. La comparaison entre les températures intérieure du bureau digitalisées et simulées avec des nattes capillaires :

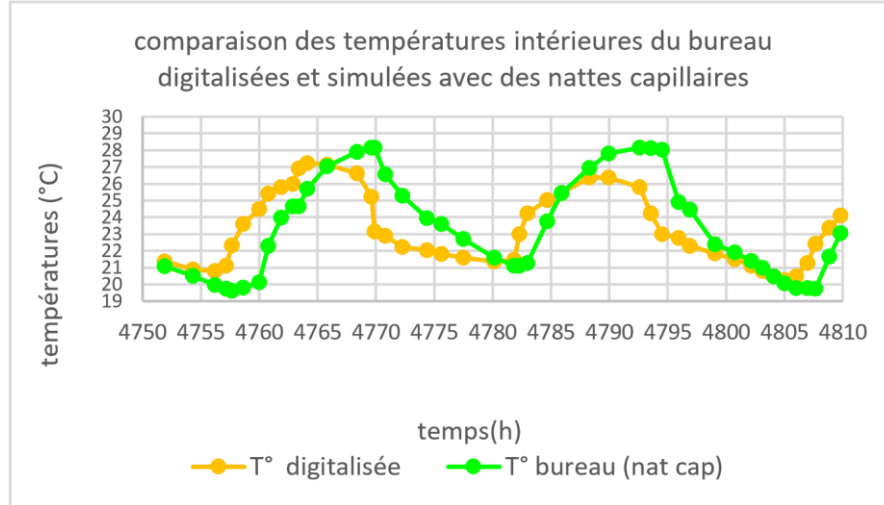


Figure.22 : comparaison des températures du bureau digitalisées et simulées avec les nattes capillaires

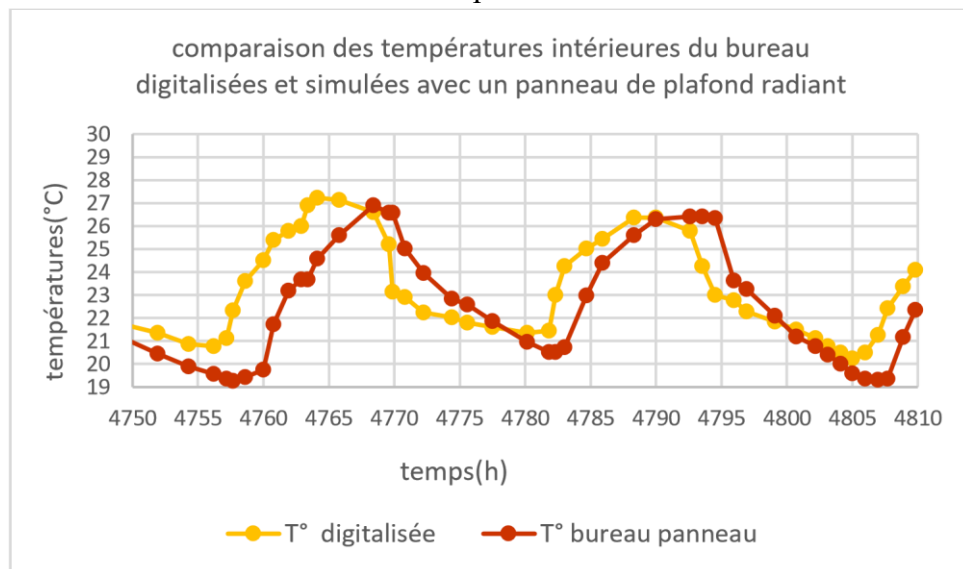


Figure.23 : comparaison des températures du bureau digitalisées et simulées avec panneau de plafond radiant.

La figure représente la variation des températures intérieures du bureau préfabriqué rafraîchi avec des nattes capillaires pour la première figure et un panneau de plafond radiant pour la deuxième figure.

On peut voir sur la figure ci-dessus que les courbes ont la même allure avec un écart des températures maximales et minimales ainsi qu'un décalage sur le temps de réponse surtout pour les nattes capillaires.

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

On peut expliquer ces différences par l'influence de la température ambiante (extérieure) sur la bâtisse, surtout si elle est d'une faible inertie thermique comme dans notre cas mais aussi au temps de réponse du système de rafraîchissement (le temps d'évacuer la chaleur accumulée à l'intérieure du bureau). Sachant que les courbes des températures ambiantes marquent ce décalage.

1.3.Les températures ambiantes (extérieures) :

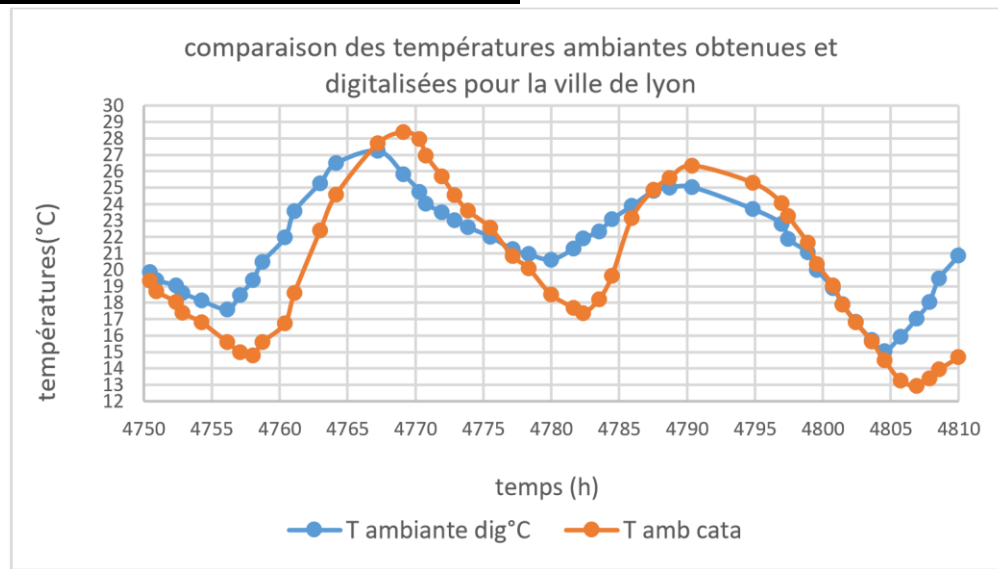


Figure 24: comparaison des températures ambiantes obtenues et digitalisées pour la ville de Lyon.

La figure 24 représente la variation des températures ambiantes (extérieures). Les deux courbes ont la même allure mais les pics maximums et minimums différents et ne sont pas atteints au même instant.

Les erreurs calculées pour les températures intérieures sont acceptables et elles sont expliquées par la figure 24, qui représente l'écart entre les températures ambiantes de Catalina et les nôtres qui est dû à la version de TRNSYS utilisée par T.Catalina était la version .15 alors que nous c'était la version 16. Avec des mises à jour de Météonorm.

2. L'effet du panneau rafraichissant avec le mur double brique à Bejaia :

Pour ce travail on a utilisé le mur double brique séparé par une lame d'air de 5cm, avec une température d'entrée de l'eau de 21°C et un débit de 180kg/h.

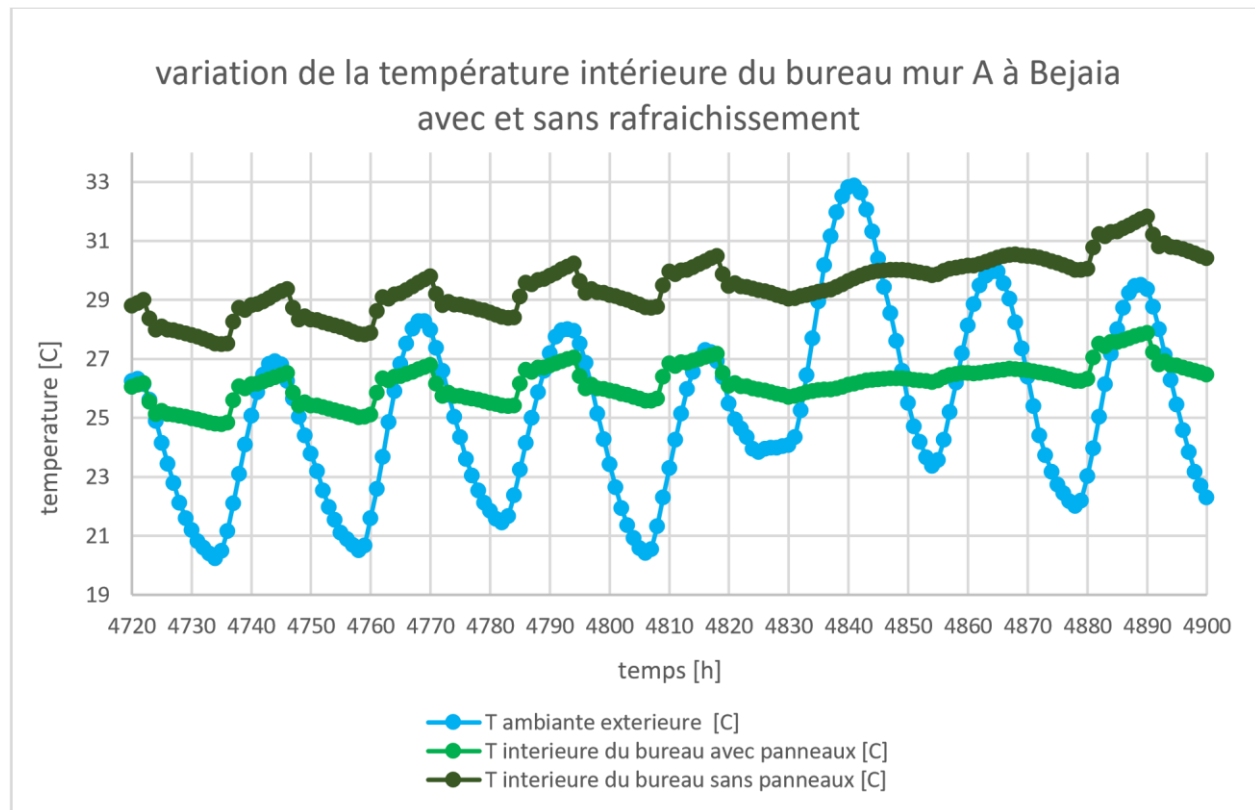


Figure 25 Variation de la température de bureau avec mur type « A » à Bejaia

La figure 25 Présente la variation de la température intérieure du bureau avec des murs double brique avec et sans le système de rafraichissement à Bejaia. On observe que la température extérieure varie significativement entre 20 °C et plus de 33 °C. En l'absence de système de rafraichissement, la température intérieure dépasse régulièrement les 28 °C, atteignant parfois plus de 30 °C. Cela démontre un inconfort thermique notable pour les occupants, notamment durant les heures de forte chaleur. En revanche, l'introduction d'un plafond rafraîchissant (PANNEAU RADIANT) permet de maintenir une température intérieure nettement plus stable et modérée,

oscillant autour de 25 à 27 °C. Cette régulation thermique améliore sensiblement le confort intérieur, en limitant l'impact des pics de chaleur extérieurs.

2. L'effet du panneau rafraichissant avec le mur double brique à Mechria :

Pour ce travail on a utilisé le mur double brique séparé par une lame d'air de 5cm, avec une température d'entrée de l'eau de 17°C et un débit de 180kg/h.

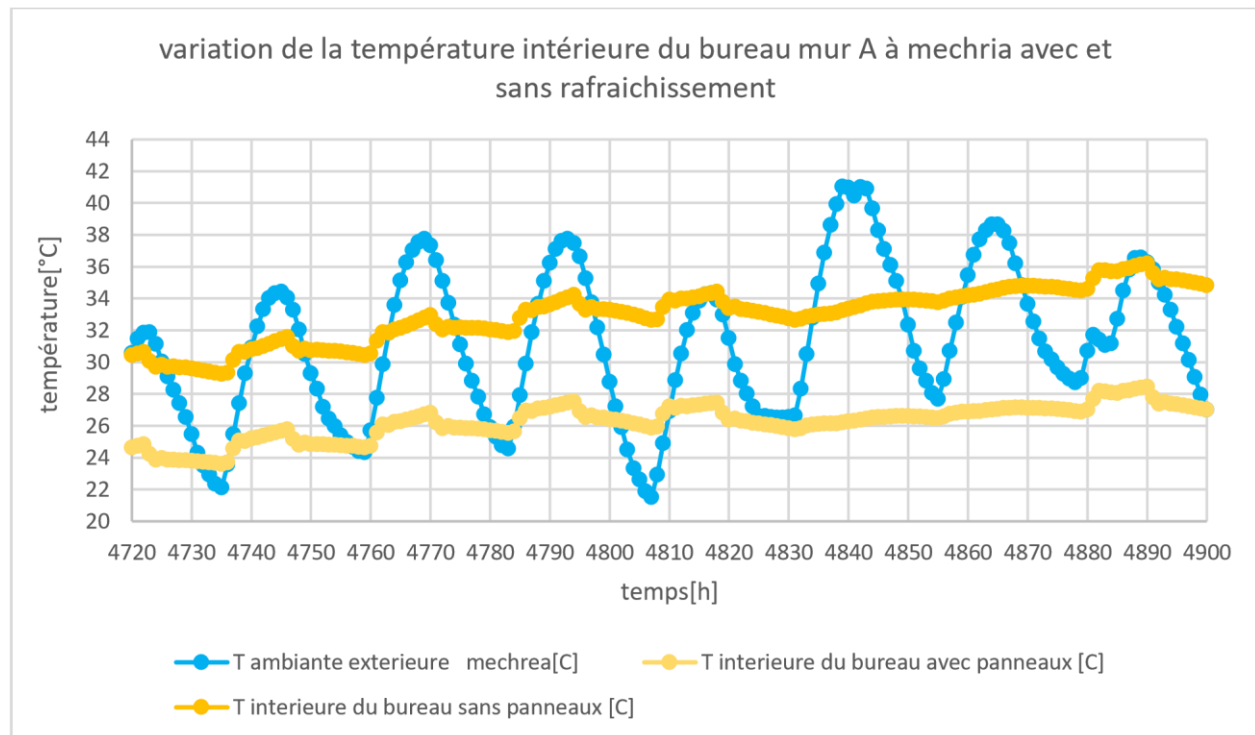


Figure 26 Variation de la température de bureau avec mur type A à Mechria

La figure 26 illustre l'évolution des températures intérieures du bureau avec des murs double brique à Mechria, comparant deux configurations : avec et sans système de rafraîchissement par panneaux. Les résultats montrent une efficacité notable du système, avec une réduction thermique moyenne de 6 à 8°C par rapport aux températures sans rafraîchissement. La température intérieure sans rafraîchissement suit étroitement les variations extérieures, atteignant des pics proches de 40°C, tandis que le système de rafraîchissement maintient une plage thermique plus stable, entre 24 et 28.5°C, malgré des températures extérieures dépassant parfois 40°C. Cette stabilisation démontre l'utilité du plafond rafraîchissant pour améliorer le confort dans les zones semi-arides comme Mechria, où les amplitudes thermiques journalières restent importantes.

2.1 L'effet du panneau rafraichissant avec le mur double brique dans les villes du sud :

Pour ce travail on a utilisé le mur double brique sépare par une lame d'air de 5cm, avec une température d'entrée de l'eau de 17°C et un débit de 180kg/h.

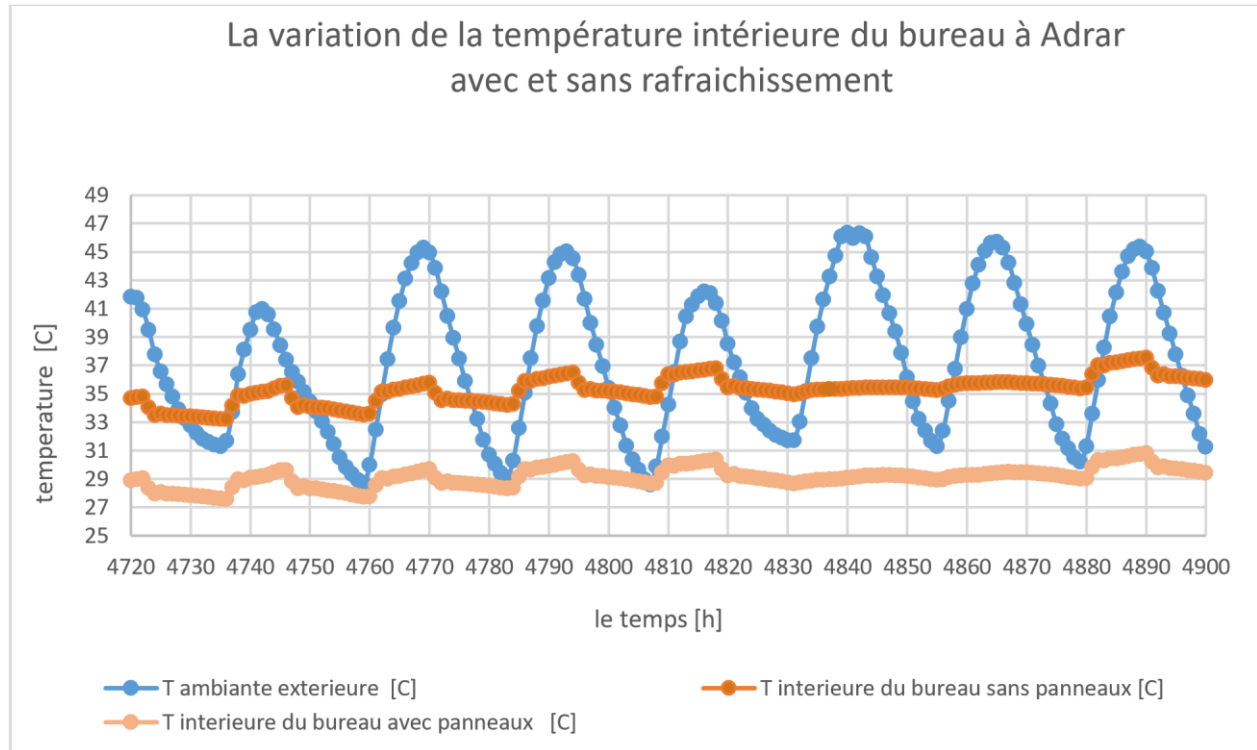


Figure 27 Variation de la température de bureau avec mur type A a Adrar

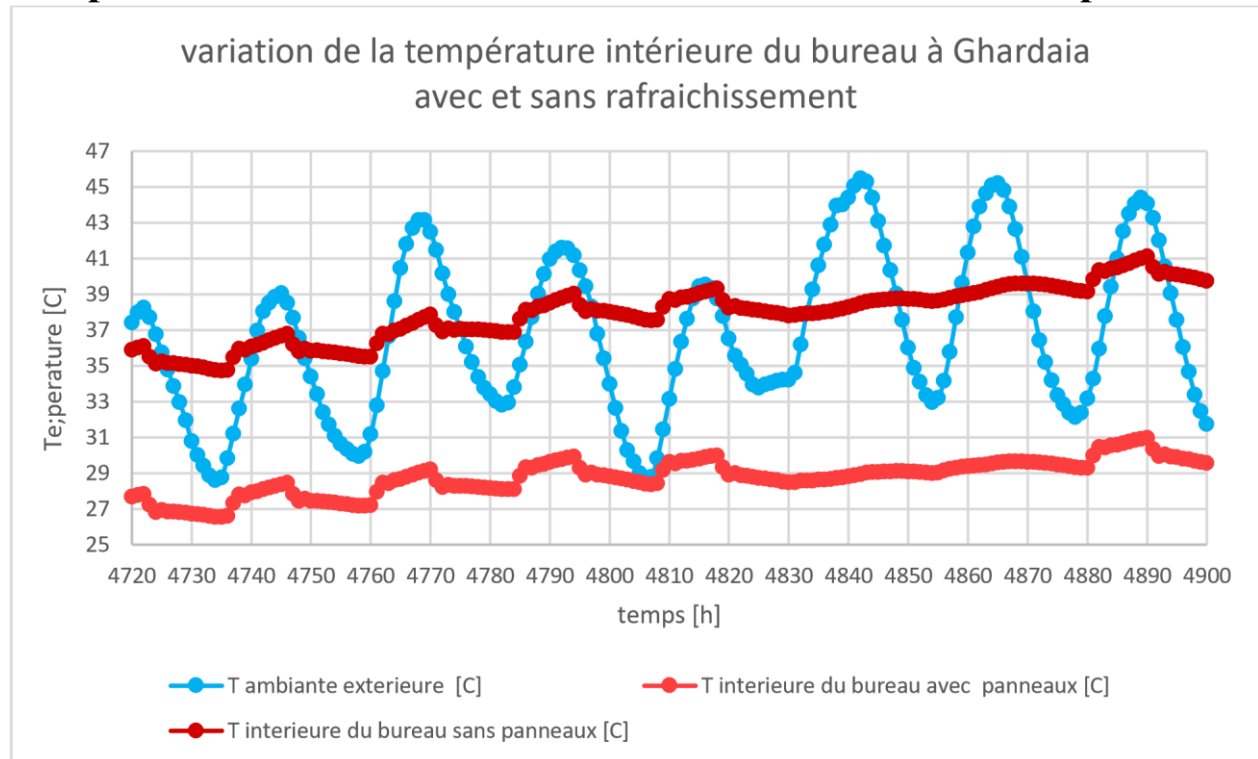


Figure 28 Variation de la température de bureau avec mur type A a Ghardaïa

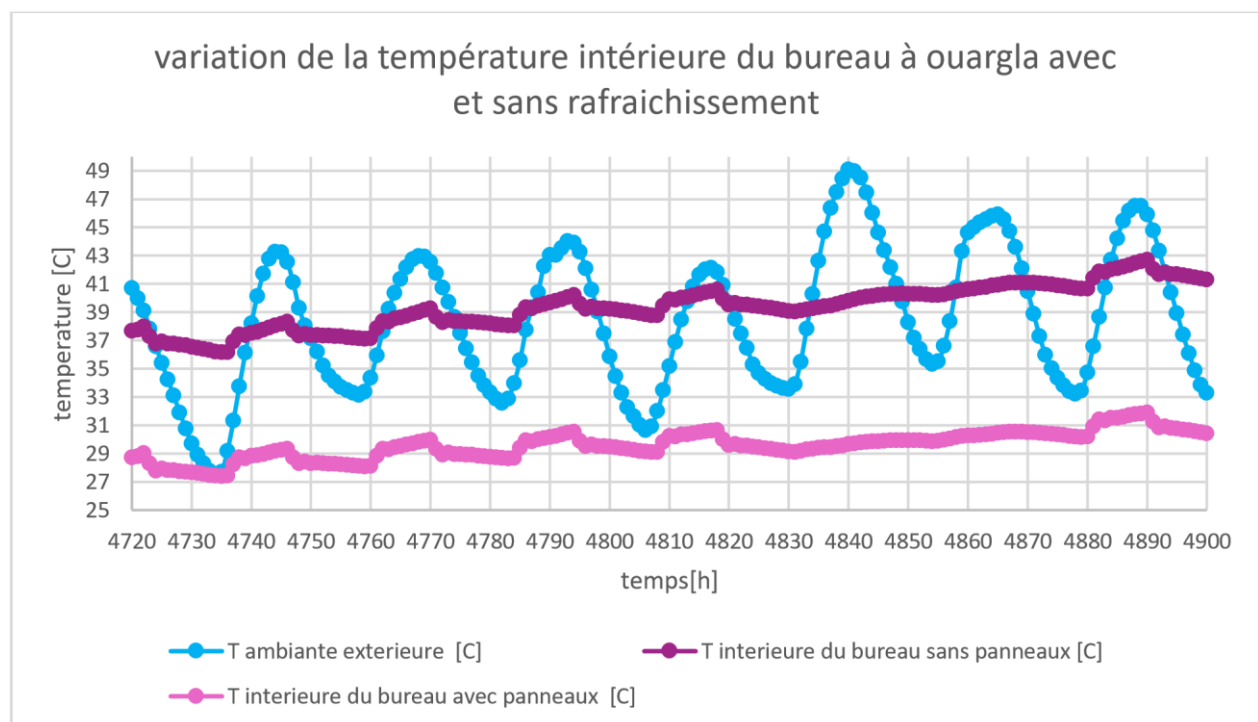


Figure 29 Variation de la température de bureau avec mur type A a Ouargla

Les figures 29 Présentent la variation de la température intérieure du même bureau avec des murs double brique avec et sans le système de rafraîchissement à Adrar, Ghardaïa et Ouargla , où les températures ambiantes sont très importantes et caniculaires. Dans les trois villes, l'utilisation du panneau réduit significativement la température intérieure avec des écarts moyens atteignant jusqu'à 10°C. Les courbes "avec rafraîchissement" montrent une stabilisation thermique, atténuant les pics de chaleur extérieure, particulièrement marqués dans ces zones arides où les températures dépassent souvent 45°C. A Ghardaïa le panneau présente une efficacité légèrement supérieure, probablement due à des conditions climatiques moins extrêmes qu'Adrar ou Ouargla. Ces résultats confirment l'importance des systèmes de refroidissement passifs ou semi actifs dans l'architecture des régions désertiques pour améliorer le confort thermique et réduire la dépendance énergétique.

2.3 Effet du panneau rafraichissant avec le mur isolant à Bejaia :

Le mur utilisé pour ce travail est le mur double brique séparé par 5 cm de polystyrène extrudé avec une température d'entrée de l'eau de 21°C et un débit de 180kg/h.

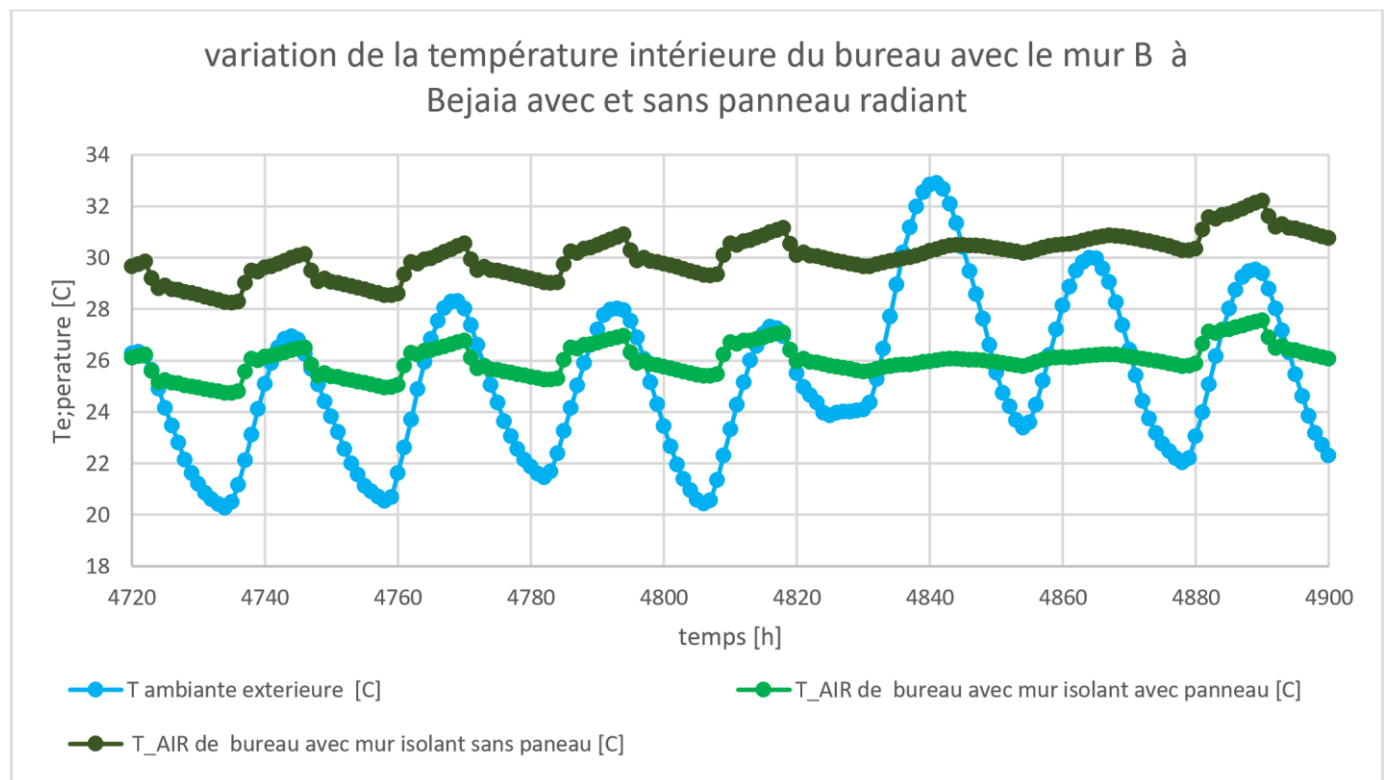


Figure 30 La variation de la température de bureau en mur type « B » BEJAIA

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

La figure 30 Présente la variation de la température extérieure de la ville de Bejaia zone E1, et la température intérieure du bureau avec le mur B (remplaçant la lame d'air par du polystyrène extrude) avec et sans panneau rafraichissant. On peut voir que les températures ambiantes varient entre 20 et 33°C, alors que les températures intérieures du bureau sans panneau rafraichissant sont de 28 à 32.2°C notant que ces dernières sont plus importantes que les températures ambiantes. L'utilisation du panneau radiant rafraichissant a fait baisser les températures intérieures jusqu'à 24.8 °C mettant en évidence l'efficacité du panneau qui a réduit la température de 4 à 5 °C. Même si les températures du bureau rafraichis sont proches des températures ambiantes, elles restent dans la plage du confort thermique.

2.4 Effet du panneau rafraichissant avec le mur isolant à Mechria :

Le mur utilisé pour ce travail est le mur double brique séparé par 5 cm de polystyrène extrudé avec une température d'entrée de l'eau de 17°C et un débit de 180kg/h.

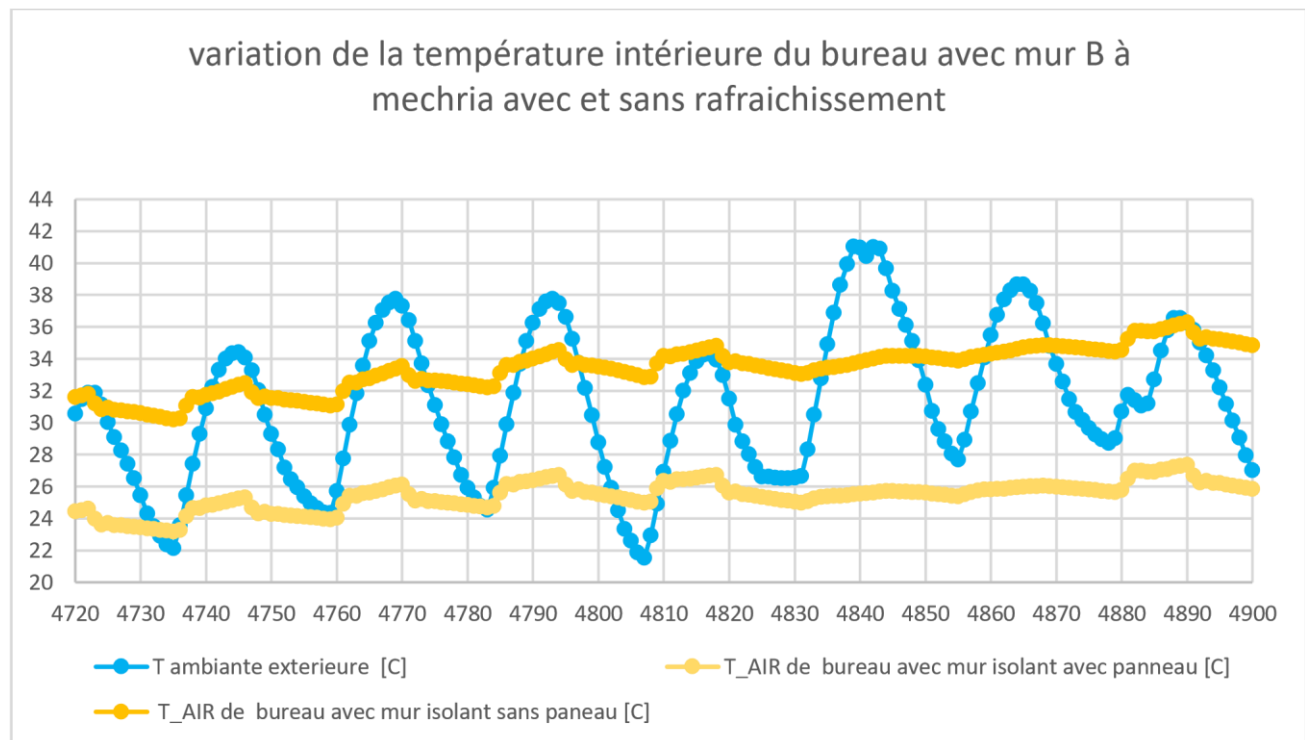


Figure 31 Variation de la température de bureau avec mur type « B » à MECHRIA

La figure 31 présente le comportement thermique de notre bureau à Mechria bâti avec des murs isolants avec et sans système de rafraîchissement. Les résultats démontrent une amélioration notable du

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

confort thermique grâce à l'isolation combinée au système de climatisation. La configuration avec panneaux rafraîchissants maintient une température intérieure stable entre 23.17-27.33°C, alors que le bureau non climatisé subit des fluctuations importantes (30-36.3°C), suivant partiellement les variations extérieures qui atteignent 41°C. L'écart moyen de 8°C entre les deux configurations souligne l'efficacité du système.

On observe que l'isolation a fait augmenter les températures intérieures du bureau sans rafraîchissement en Revange elle a permis d'obtenir des températures très satisfaisante avec le panneau qui a atténué les pics de chaleur. La stabilité thermique obtenue avec le système complet est particulièrement remarquable, avec des variations journalières réduites à $\pm 2^{\circ}\text{C}$ contre $\pm 6^{\circ}\text{C}$ sans climatisation.

2.5 Effet du panneau rafraichissant avec le mur isolant dans les villes du sud :

Le mur utilisé pour ce travail est le mur double brique séparé par 5 cm de polystyrène extrudé avec une température d'entrée de l'eau de 17°C et un débit de 180kg/h à Ouargla, Adrar et Ghardaïa. .

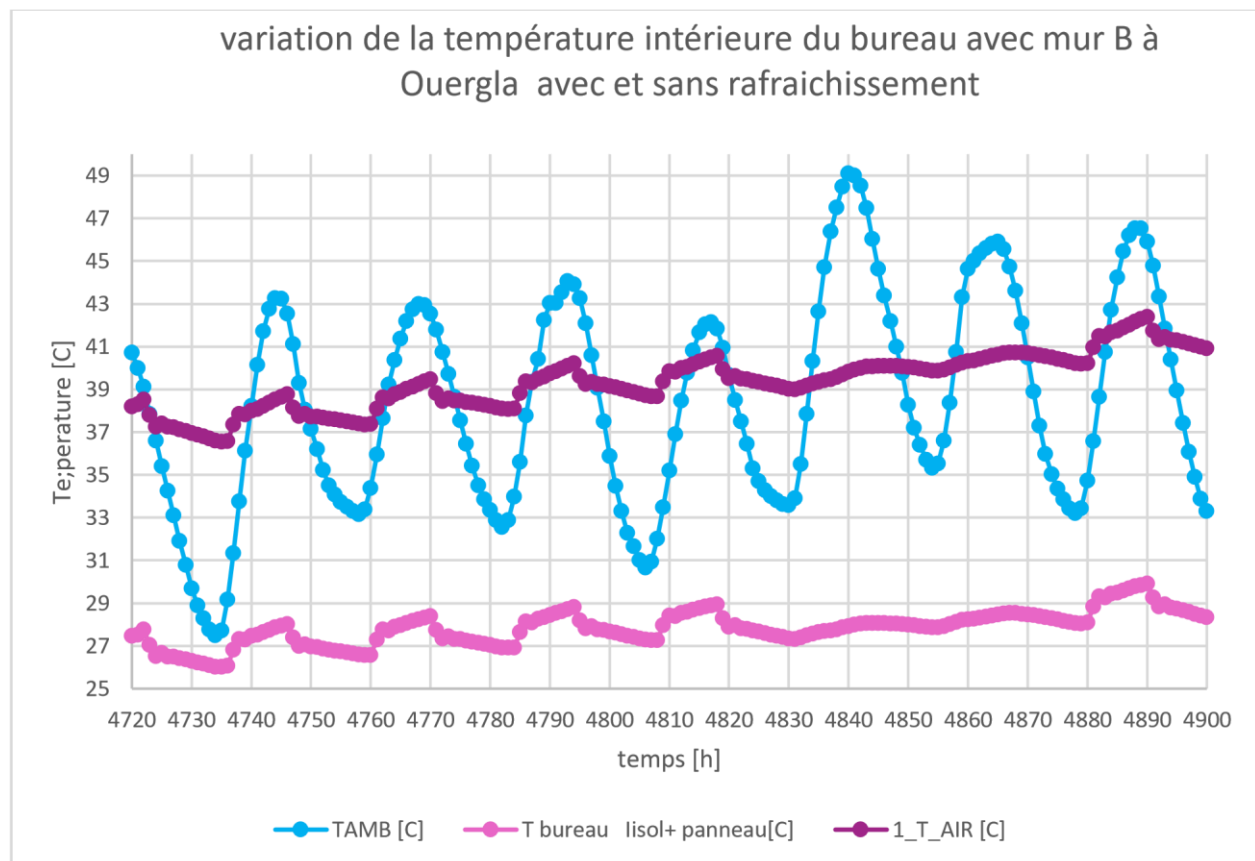


Figure 32 Variation de la température de bureau avec mur type « B » à OUERGLA

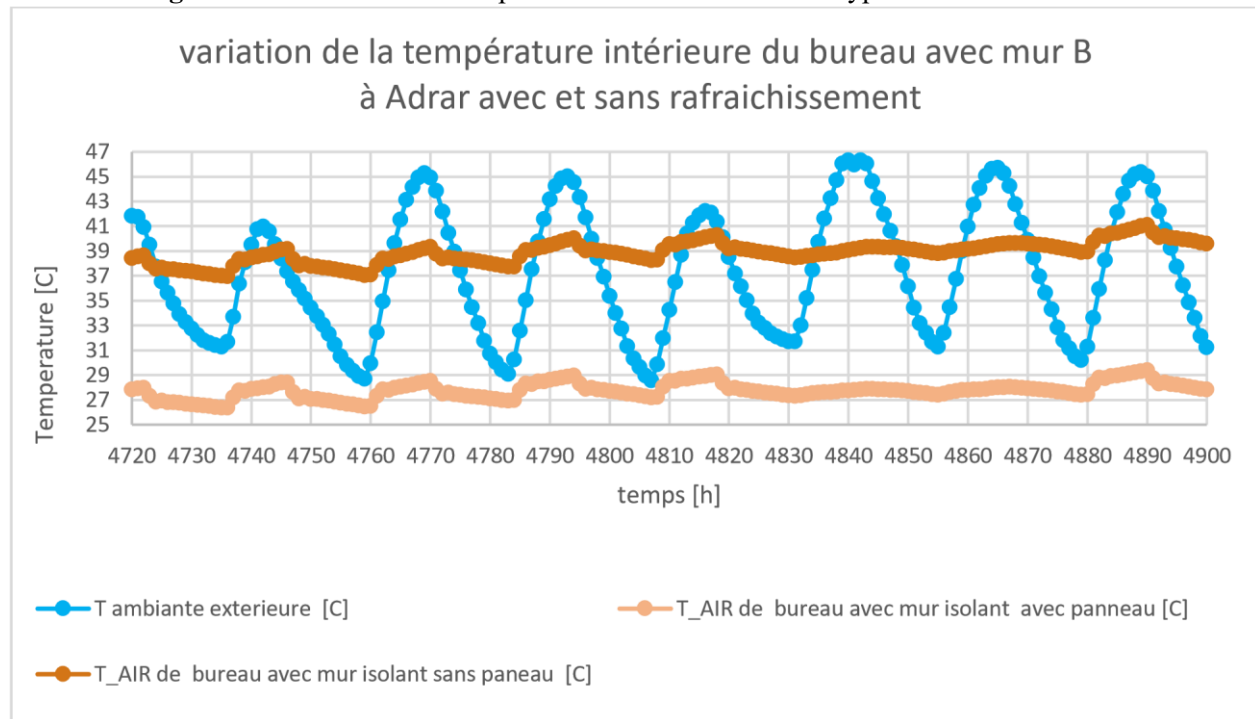


Figure 33 Variation de la température de bureau avec mur type B a ADRAR

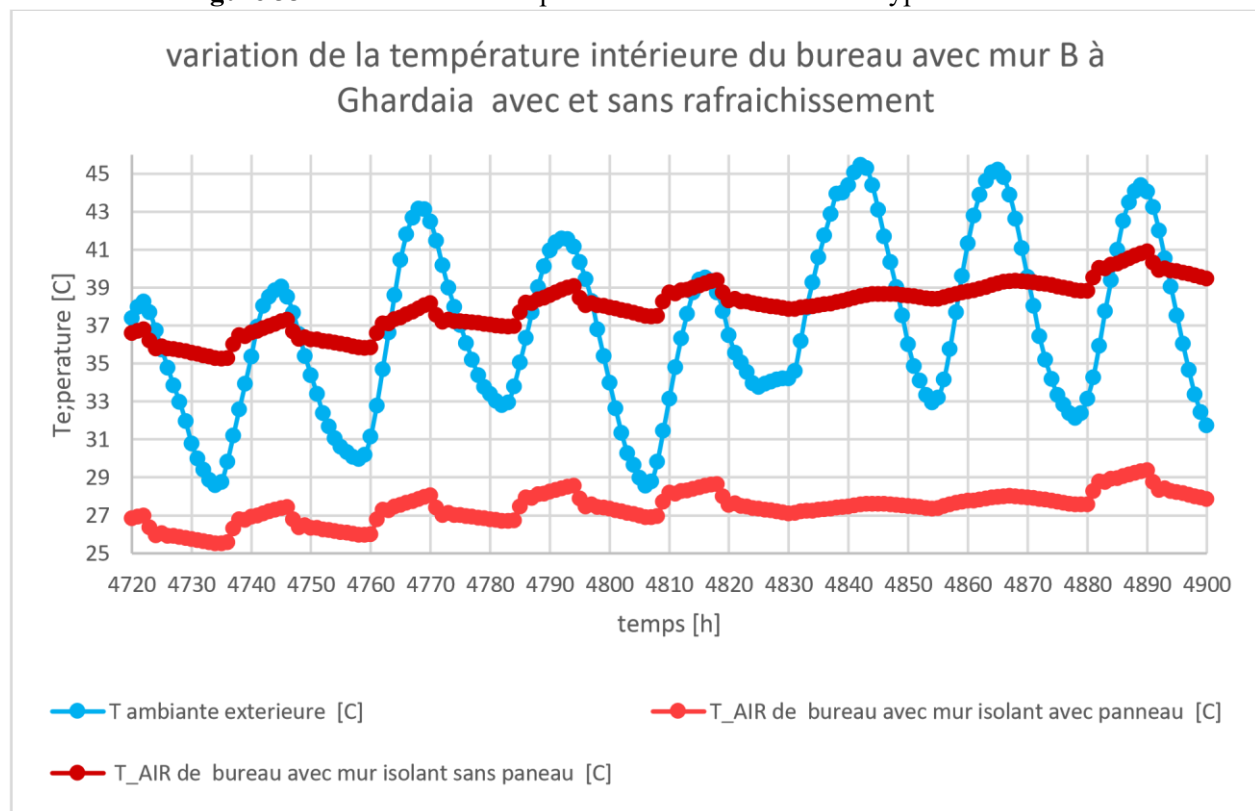


Figure 34 Variation de la température de bureau avec mur type B A GHARDAIA

La figure 31 présente les variations de la températures intérieures du bureau avec le mur isolé dans les trois villes du sud. L'analyse des données thermiques à Ghardaïa, Ouargla et Adrar démontre clairement l'apport déterminant du plafond rafraîchissant dans la régulation thermique des bâtiments. Dans les trois sites étudiés. Le système de plafond rafraîchissant permet de maintenir des températures intérieures notablement plus basses que la configuration sans ce dispositif, malgré des conditions climatiques extrêmes.

À Ghardaïa la température du bureau sans rafraîchissement varie de 35.29 à 41 °C, des températures qui sont loin des températures de confort thermique alors qu'avec le panneau rafraîchissant les températures étaient les plus satisfaisantes qui atteignent 25 °C.

À Adrar la température intérieure reste constamment élevée, fluctuant entre 36 °C et 41 °C, avec une faible capacité de régulation thermique face aux variations diurnes de la température extérieure, qui oscille fortement entre 28,7 °C la nuit et plus de 46,3 °C en journée. En revanche, l'ajout du plafond rafraîchissant entraîne une baisse significative de la température intérieure, la maintenant entre 26,4 °C et 29,37 °C, avec une stabilité thermique remarquable malgré les fortes amplitudes climatiques extérieures.

Le graphique de Ouargla montre que, sans système de rafraîchissement la température intérieure oscillant entre 36.6 °C et 42.4 °C, suivant une tendance parallèle à celle de la température ambiante extérieure qui atteint jusqu'à 49 °C. En revanche, avec l'intégration du plafond rafraîchissant, la température intérieure chute considérablement, se stabilisant entre 26 °C et 29,8 °C. Ces résultats sont similaires à ceux observés à Adrar, où l'écart entre les températures intérieure et extérieure dépasse 11 °C grâce à ce système, confirmant son efficacité.

2.6 Effet du panneau rafraîchissant avec le mur en brique de terre cuite pleine « C » à Bejaia :

Le mur utilisé pour ce travail est le mur en terre cuite pleine avec une épaisseur de 40 cm à Bejaia. Avec une température d'entrée de l'eau de 21 °C et un débit de 180 kg/h.

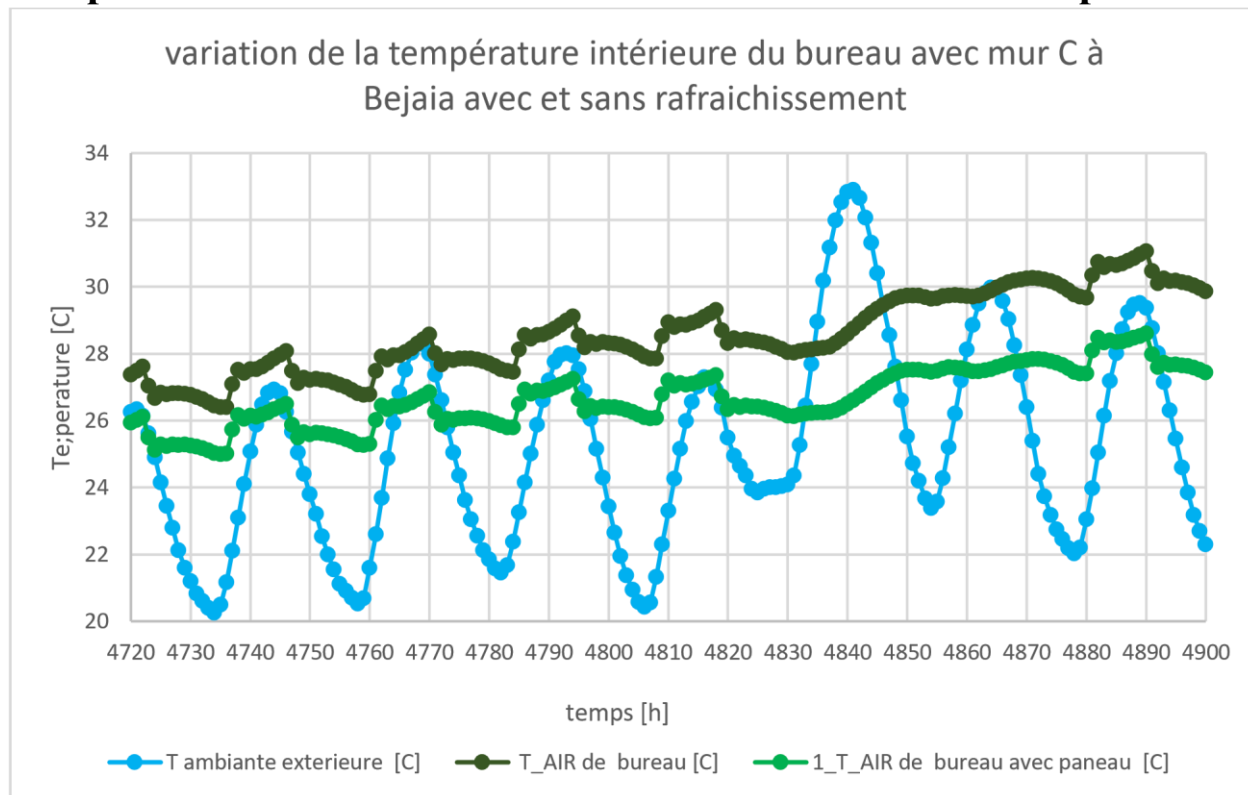


Figure 35 Variation de la température de bureau avec mur type C a Bejaia

La figure 32 illustre comment la température varie dans un bureau situé à Bejaia, avec des murs en terre cuite, dans deux scénarios : avec et sans plafond rafraichissant. L'observation ci-dessus indique que la température externe subite des variations croissantes et décroissantes marquées par des plages distinctes ayant des pics atteignant presque 33 °C et des baisses se situant autour de 20 °C. D'autre part, la température intérieure sans refroidissement est relativement plus stable mais reste dans une fourchette plus élevée, fluctuant entre 26.5°C et 31 °C. Comparé à la température intérieure sans rafraîchissement, la pièce avec rafraichissement est comparativement plus fraîche, avec une température oscillante entre 25 °C et 28,5 °C. Cette différence accentue l'efficacité du plafond rafraichissant dans le contrôle thermique du bureau, en modérant les températures extrêmement chaudes tout en garantissant un meilleur confort thermique.

2.7 Effet du panneau rafraichissant avec le mur en brique de terre cuite pleine à Mechria :

Le mur utilisé pour ce travail est le mur en terre cuite pleine avec une épaisseur de 40 cm à Bejaia. Avec une température d'entrée de l'eau de 17°C et un débit de 180kg/h.

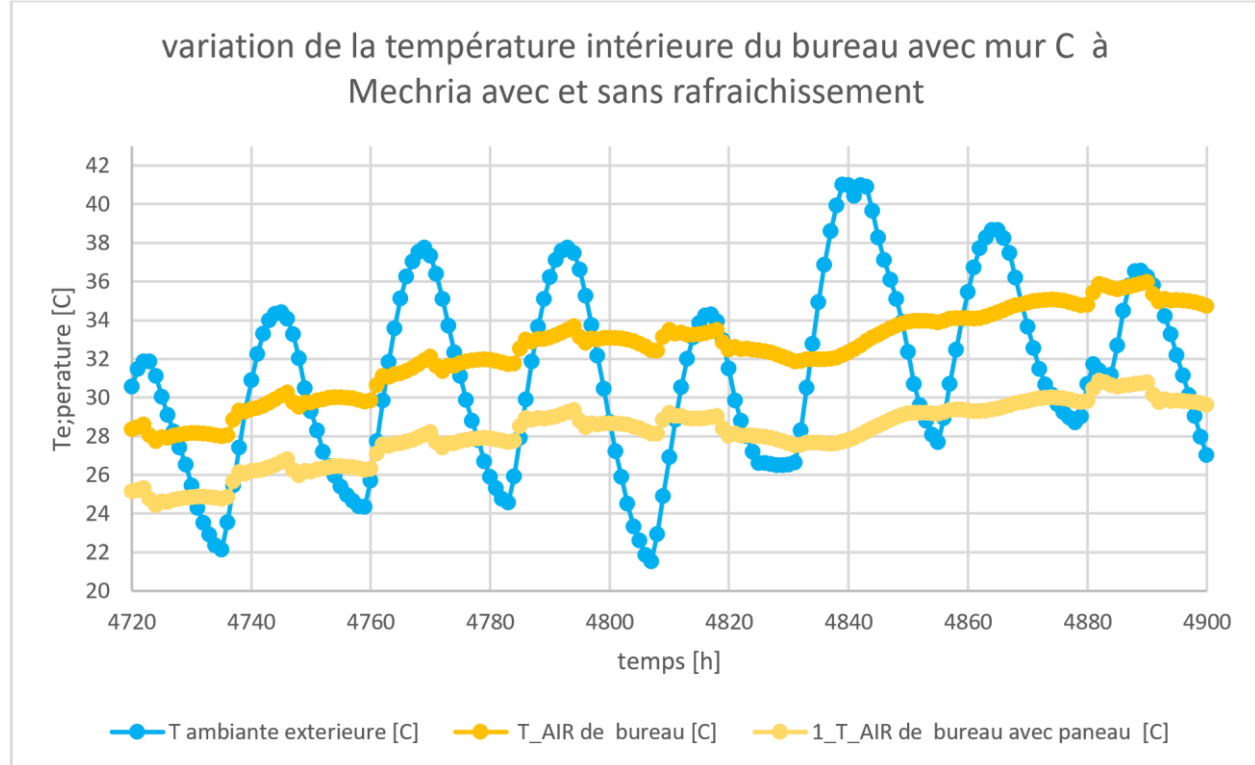


Figure 36 Variation de la température de bureau avec mur type « C » à MECHRIA

Le graphique ci-dessus illustre la variation de la température intérieure d'un bureau situé à Mechria, construit avec des murs en terre cuite, en comparant deux configurations : avec et sans plafond rafraîchissant. On observe que la température extérieure varie fortement, atteignant jusqu'à 41 °C et descendant jusqu'à 21 °C, reflétant un climat continental marqué par de fortes amplitudes thermiques. La température intérieure sans rafraîchissement suit une évolution plus stable mais reste élevée, oscillant entre 28 °C et 36 °C, ce qui peut engendrer un inconfort thermique. En revanche, l'utilisation du plafond rafraîchissant permet de maintenir une température intérieure plus modérée, généralement comprise entre 24.5 °C et 30.8 °C, soit une réduction moyenne de 4 à 5 °C. Cela montre l'efficacité du système de rafraîchissement dans l'amélioration du confort thermique.

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

2.8 Effet du panneau rafraichissant avec le mur en brique de terre cuite pleine dans les villes du sud :

Le mur utilisé pour ce travail est le mur double brique séparé par 5 cm de polystyrène extrudé avec une température d'entrée de l'eau de 17°C et un débit de 180kg/h à Adrar ,Ouargla et Ghardaïa.

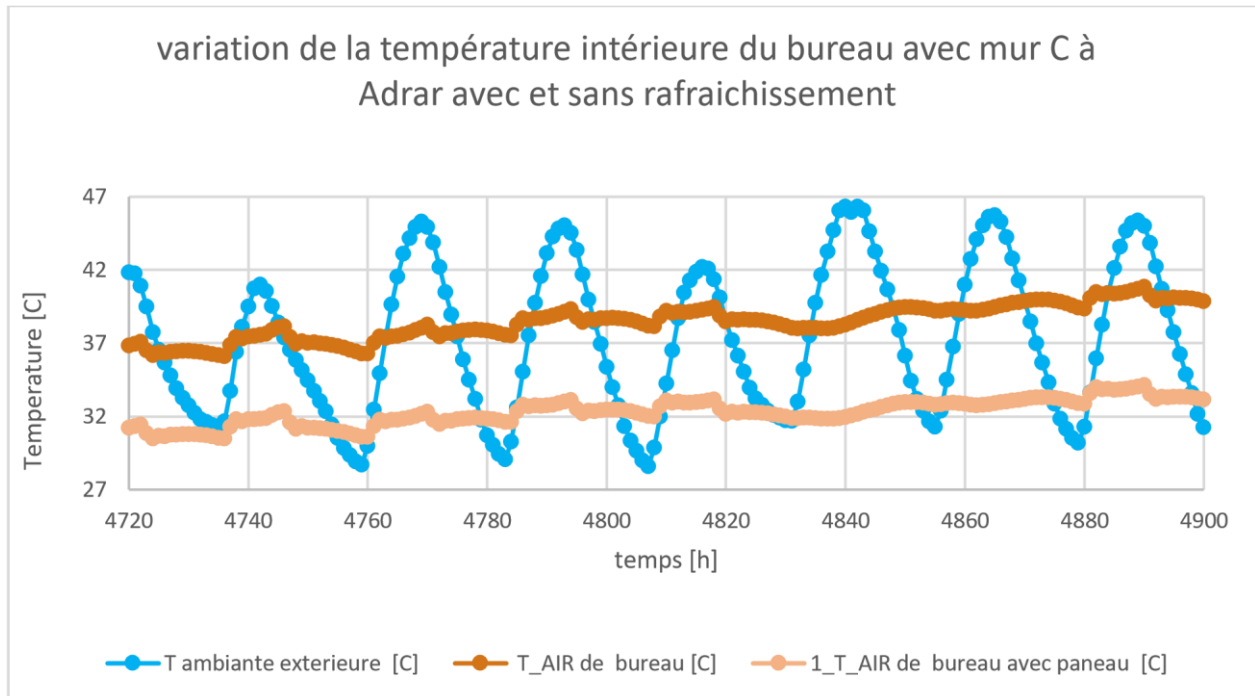


Figure 37 Variation de la température de bureau avec mur type C a Adrar

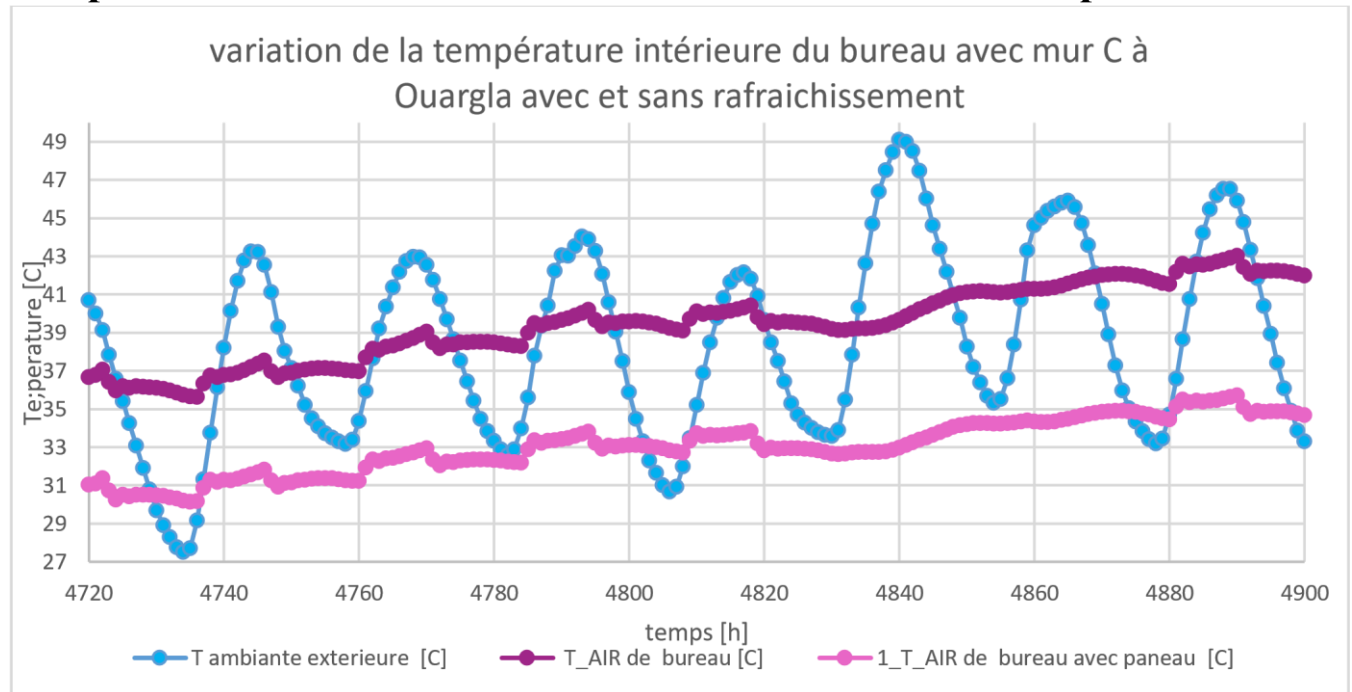


Figure 38 Variation de la température de bureau avec mur type C a Ouargla

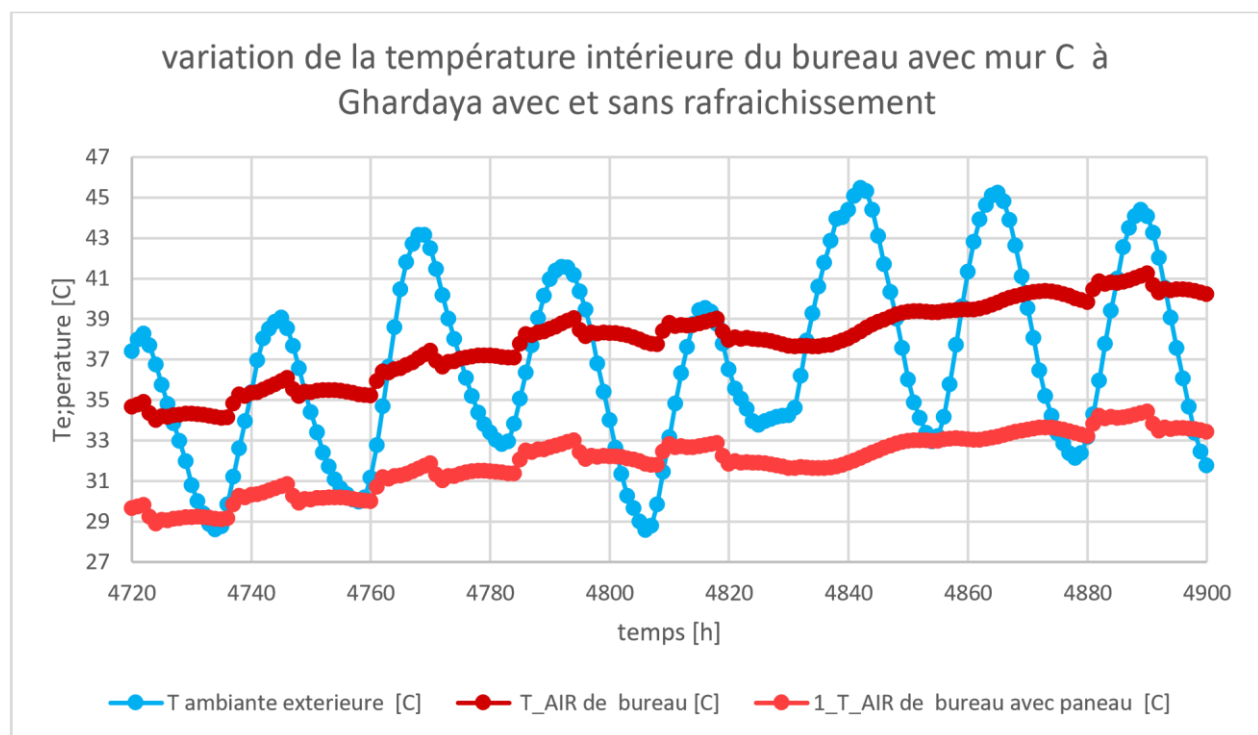


Figure 39 Variation de la température de bureau avec mur type C a Ghardaya

Les résultats présentés dans les graphes illustrent l'évolution horaire de la température intérieure d'un bureau équipé de murs en terre cuite (mur type C), dans les villes de Ghardaïa, Ouargla et Adrar, avec et sans système de plafond rafraîchissant. Ces données sont comparées à la température ambiante extérieure propre à chaque région.

Globalement, les trois villes sahariennes présentent un climat très chaud avec des températures extérieures diurnes souvent supérieures à 42 °C. Toutefois, l'analyse met en évidence que le comportement thermique intérieur varie sensiblement selon la localité et la présence du système de rafraîchissement.

À Ghardaïa, la température intérieure sans rafraîchissement (courbe rouge) reste relativement élevée, oscillant entre 34 °C et 42 °C, ce qui reflète la faible inertie thermique face aux fortes chaleurs. En revanche, l'intégration du plafond rafraîchissant (courbe rouge clair) permet de réduire la température intérieure d'environ 5 à 7°C, la maintenant en moyenne autour de 29 à 33 °C, ce qui représente une petite amélioration du confort thermique.

À Ouargla, caractérisée par un climat encore plus extrême, la température intérieure sans rafraîchissement (courbe violette) dépasse fréquemment les 40 °C, approchant la température ambiante extérieure. Cependant, avec l'activation du plafond rafraîchissant (courbe rose), la température est nettement modérée, stabilisée autour de 32.5 °C, démontrant une efficacité légère du système à cause des conditions climatiques extrêmes.

Enfin, à Adrar, bien que les températures extérieures soient comparables à celles d'Ouargla, l'effet du rafraîchissement semble légèrement plus marqué. La température intérieure sans rafraîchissement (courbe jaune) varie entre 36 °C et 41 °C, tandis qu'avec le plafond rafraîchissant (courbe rose), elle chute à une moyenne de 30 à 34 °C, avec des pics maximums inférieurs à ceux observés à Ouargla.

Pour mieux comprendre le comportement thermique du panneau par rapport au différent matériau de construction et le climat de la région, on va comparer les différentes températures obtenues pour les différentes villes.

3. Compraison des temperatures interieures du bureau obtenues dans la ville de Bejaia zone E1:

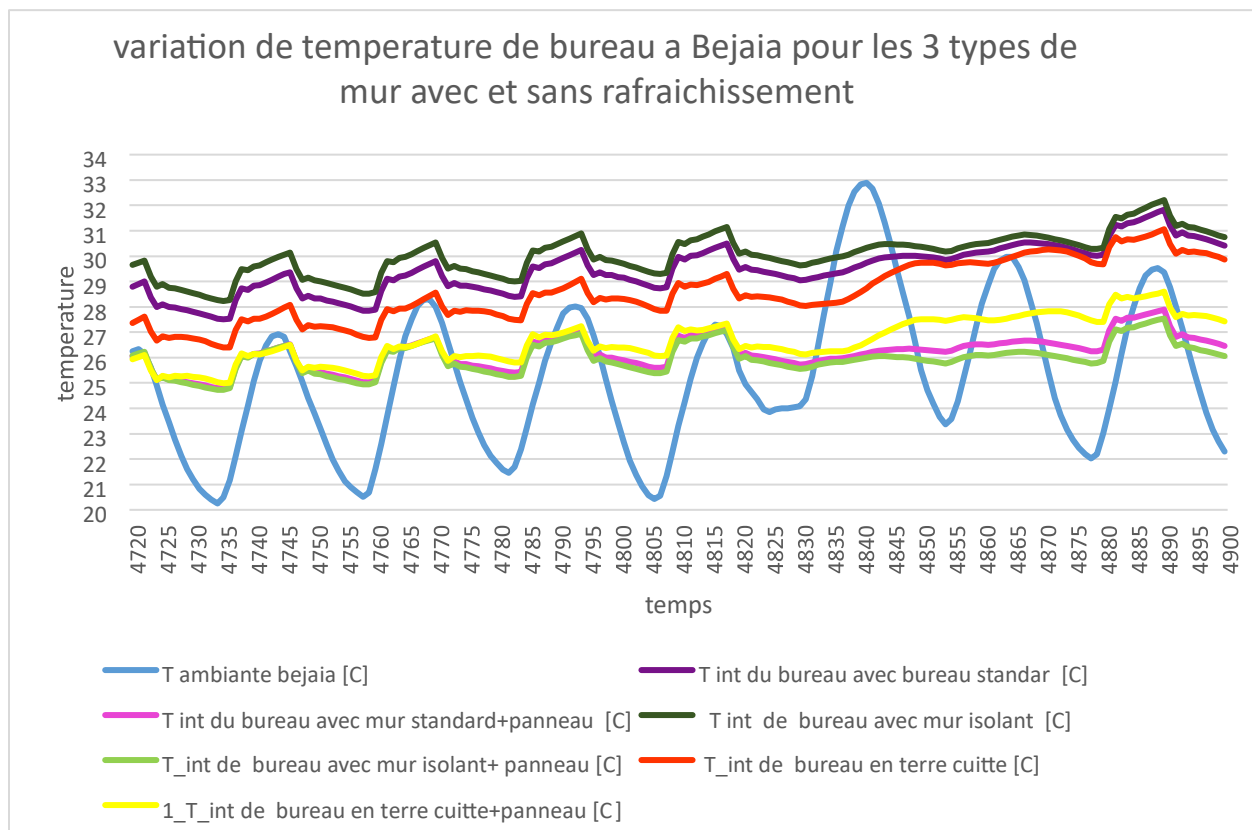


Figure 40 variation de température de bureau a Bejaia pour les 3 types de mur avec et sans rafraichissement

Le graphe ci-dessus illustre la variation de température intérieure d'un bureau à Béjaïa, en fonction de trois types de murs – mur standard en double brique, mur en terre cuite, et mur isolant – et ce, avec et sans l'utilisation d'un plafond rafraîchissant. Le climat de Béjaïa, de type méditerranéen chaud, se distingue par des températures extérieures modérées par rapport à celles d'Adrar, comme le montre la courbe bleue représentant la température ambiante, avec des variations entre 20 °C et 33 °C. Cette amplitude plus faible permet une analyse plus précise de l'efficacité thermique des différentes configurations de parois.

En l'absence de plafond rafraîchissant, les courbes violette (mur standard), rouge (mur en terre cuite) et vert foncé (mur isolant) montrent que la température intérieure reste systématiquement supérieure à la température ambiante extérieure, atteignant des pics de 30 à 32 °C. Le Mur en terre cuite (rouge) affiche la meilleure performance dans cette configuration, grâce à sa capacité à réduire les gains thermiques par conduction, suivi par le mur standard (violette). Le mur isolant (vert foncé) présente la température intérieure la plus élevée et la plus instable, indiquant une mauvaise performance thermique.

Avec l'ajout d'un plafond rafraîchissant, les performances thermiques sont nettement améliorées. Les courbes correspondantes – rose (mur standard + panneau), jaune (terre cuite + panneau) et vert clair (isolant + panneau) – montrent des températures intérieures plus proches de l'ambiance extérieure, oscillant entre 24.7 °C et 28 °C, soit une baisse de 3 à 4 °C en moyenne par rapport aux configurations sans rafraîchissement. La solution la plus efficace reste l'association mur isolant + plafond rafraîchissant (vert clair), avec une température intérieure quasi constante autour de 25–26 °C. Le mur standard+panneau (rose) vient ensuite, suivi par le mur en terre cuite avec panneau (jaune), qui bien qu'amélioré, reste thermiquement moins performant que les autres.

Ainsi, cette étude montre qu'à Bejaïa, l'influence de l'enveloppe thermique du bâtiment reste déterminante, même dans un climat plus tempéré. L'intégration d'un plafond rafraîchissant apporte un gain thermique significatif, particulièrement lorsqu'il est combiné à une enveloppe performante comme les murs isolés ou en terre cuite. Ces résultats confirment la pertinence d'une approche bioclimatique dans la conception des bâtiments tertiaires, visant à améliorer le confort thermique tout en réduisant les besoins énergétiques de climatisation.

4. Comparaison des températures intérieures du bureau obtenues dans la ville de Mechria zone E2:

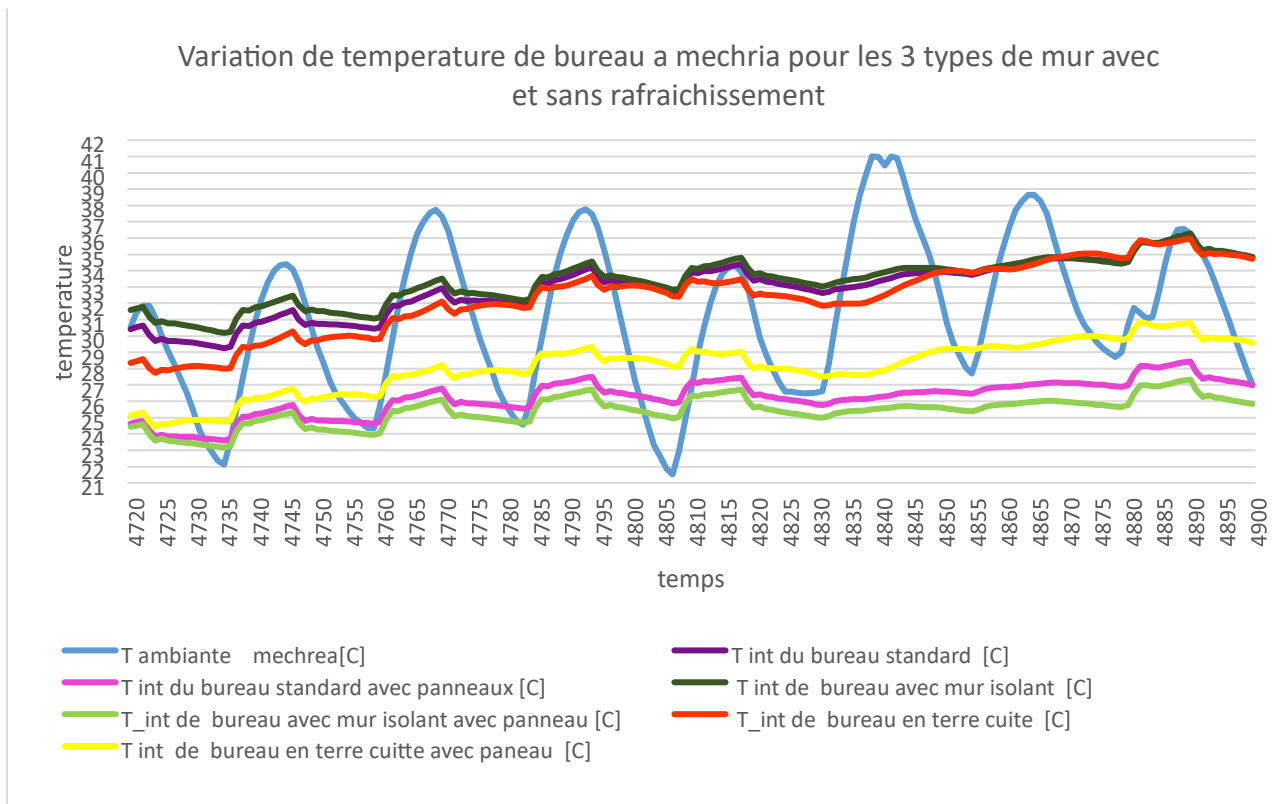


Figure41 Variation de temperature de bureau a mechria pour les 3 types de mur avec et sans rafraichissement

Le graphique ci-dessus présente la variation de la température intérieure d'un bureau à Mecheria, en fonction de trois types de murs (mur standard en double brique, mur en terre cuite, et mur isolant), et ce avec ou sans l'intégration d'un plafond rafraîchissant. Le climat de Mecheria, de type semi-aride, se distingue par des amplitudes thermiques importantes, comme en témoigne la courbe bleue représentant la température ambiante, oscillant entre 21.5 °C et 41 °C, traduisant l'impact direct des fortes chaleurs diurnes.

En l'absence de système de rafraîchissement, les courbes violette (mur standard), rouge (mur en terre cuite) et vert foncé (mur isolant) révèlent des températures intérieures élevées, atteignant fréquemment les 34 °C. Le mur en terre cuite (rouge) offre la meilleure performance en limitant la transmission thermique vers l'intérieur par l'inertie thermique, ce qui se traduit par une température légèrement inférieure à celle des configurations en mur standard et en mur isolant. Le mur isolant (vert foncé), bien que bénéficiant d'une certaine isolation thermique, reste insuffisant pour faire face aux fortes températures extérieures. Le mur standard (violet) est moins performant que le mur en terre cuite, avec des températures intérieures systématiquement plus élevées.

L'ajout d'un plafond rafraîchissant transforme significativement les performances thermiques. Les courbes vert clair (isolant + panneau), rose (standard + panneau) et jaune (terre cuite + panneau) indiquent une baisse notable des températures intérieures, ramenées à une plage plus confortable entre 23 °C et 30 °C. La combinaison la plus efficace est sans conteste le mur isolant associé au plafond rafraîchissant (vert clair), permettant de maintenir une température intérieure relativement stable et nettement inférieure à celle de l'ambiance extérieure. Le mur en terre cuite couplé au plafond rafraîchissant (jaune) arrive en dernière position, démontrant l'intérêt de l'inertie thermique lorsqu'elle est renforcée par un système de régulation active. Le mur standard avec panneau (rose) améliore légèrement la situation, mais reste thermiquement moins performant que le mur isolant avec panneau.

En conclusion, pour un climat chaud comme celui de Mechria, il est évident que la combinaison d'une enveloppe performante (notamment des murs isolants) avec un plafond rafraîchissant constitue une solution optimale pour garantir le confort thermique en été, tout en minimisant les besoins en climatisation active.

Comparaison des températures interieures du bureau obtenues dans la ville de Ouargla zone E4:

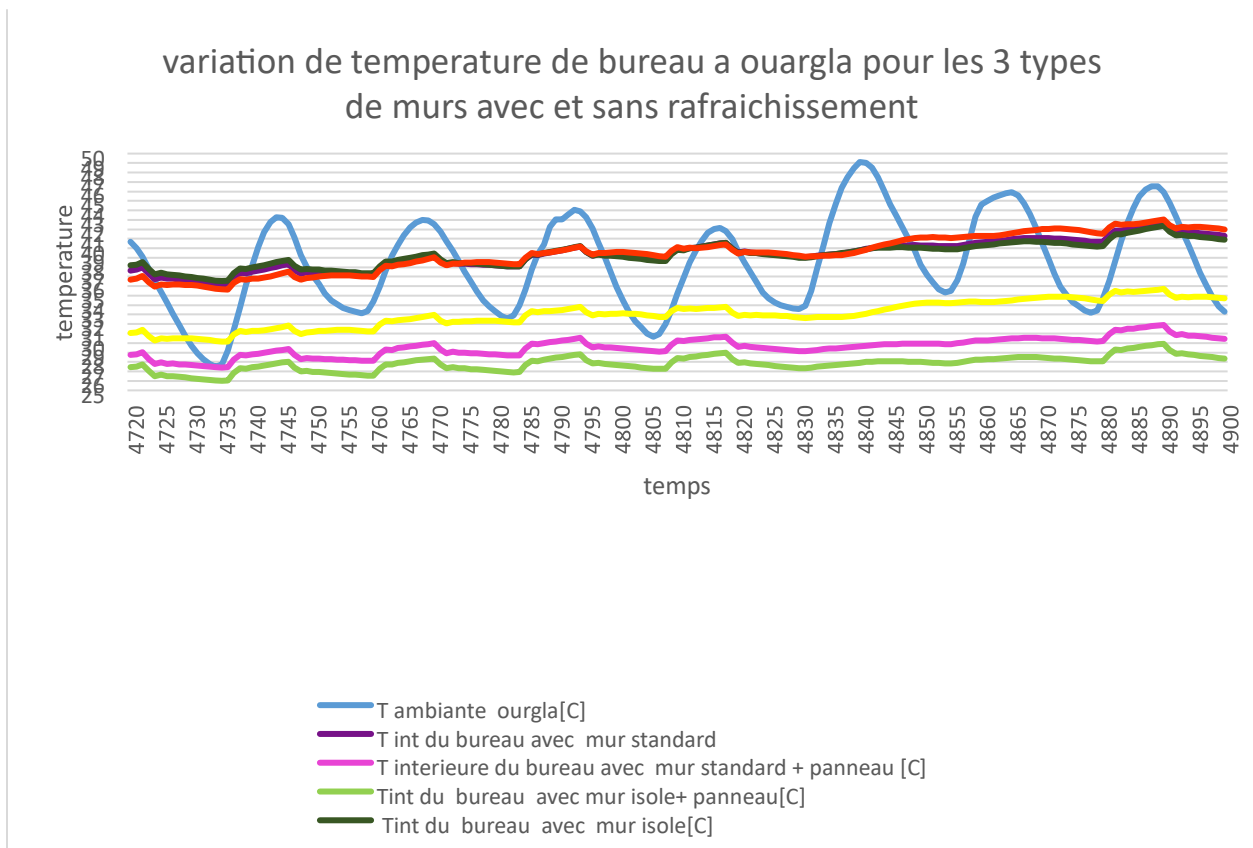


Figure 42 variation de température de bureau a ouargla pour les 3 types de murs avec et sans rafraichissement

Le graphique présenté illustre l'évolution de la température intérieure d'un bureau à Ouargla, ville caractérisée par un climat saharien extrêmement chaud, avec des températures ambiantes (courbe bleue) atteignant fréquemment plus de 46 °C en journée. Cette situation climatique impose une réflexion poussée sur la qualité thermique de l'enveloppe du bâtiment ainsi que sur les stratégies de rafraîchissement passif ou actif.

En l'absence de plafond rafraîchissant, les températures intérieures dans les trois configurations de murs (mur isolant en vert foncé, mur en terre cuite en rouge et mur standard en violet) restent élevées, généralement comprises entre 37 °C et 43 °C.

L'ajout d'un plafond rafraîchissant permet une amélioration significative des conditions intérieures. Le mur isolant associé au plafond (vert clair) offre la meilleure performance, maintenant la température autour de 26 à 29 °C, +15 °C en dessous de la température ambiante extérieure. Le mur en terre cuite couplé au plafond rafraîchissant (jaune) permet également une réduction légère, avec des températures comprises entre 30 et 35.8 °C. Enfin, l'association du mur standard avec le plafond (rose) améliore légèrement la situation (températures autour de 27.4 à 31 °C), mais reste globalement inférieure aux performances obtenues avec une enveloppe optimisée.

En conclusion, dans des conditions climatiques extrêmes comme celles de Ouargla, le choix des matériaux de construction joue un rôle crucial mais reste insuffisant seul. L'intégration d'un système de plafond rafraîchissant s'avère indispensable pour atteindre un confort thermique acceptable. La combinaison la plus efficace reste celle du mur isolant avec plafond rafraîchissant, représentant la solution optimale du point de vue de la performance énergétique et du confort d'été.

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

5. Comparaison des températures intérieures du bureau obtenues dans la ville de Adrar zone E5:

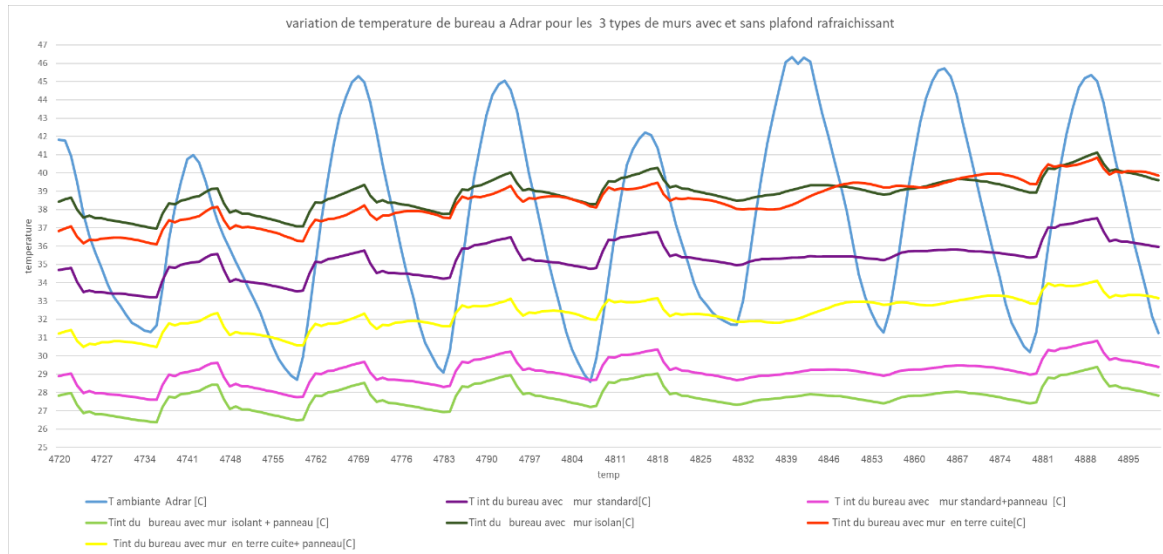


Figure 43 Comparaison des températures intérieures du bureau obtenues dans la ville de Adrar zone E5:

Le graphique présente l'évolution de la température intérieure d'un bureau situé à Adrar selon trois types de parois murales – mur standard en double brique, mur en terre cuite, et mur isolé – avec et sans l'intégration d'un plafond rafraîchissant. L'objectif est d'évaluer l'impact de ces configurations sur le confort thermique intérieur dans un climat saharien extrême. La courbe bleue, représentant la température ambiante extérieure, révèle une variation journalière marquée avec des pics dépassant régulièrement les 45 °C et des creux autour de 28 °C, traduisant l'amplitude thermique importante caractéristique de cette région désertique.

En l'absence de plafond rafraîchissant, les températures intérieures (courbes rouge et vert foncé) restent entre 36 à 41 °C, la courbe de mur standard présente une légère amélioration mais ça reste loin de notre but, ce qui indique une incapacité des parois seules à garantir un confort thermique acceptable. L'introduction du plafond rafraîchissant permet une réduction significative de la température intérieure. Les courbes correspondantes – rose (mur standard + plafond), jaune (terre cuite + plafond) et vert clair (mur isolant + plafond) – montrent des températures nettement inférieures, oscillant principalement entre 26 °C et 31 °C, sauf que la combinaison du plafond avec le mur en terre cuite reste inconvenante gardant la température régulièrement +32°C. La solution la plus performante est celle combinant mur isolé et plafond rafraîchissant (vert clair), où les pics ne dépassent jamais 29.4 °C, assurant ainsi un confort thermique optimal même lors des journées

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

les plus chaudes. La combinaison standard + plafond (jaune) arrive en deuxième position avec une différence de 1.5°C par rapport au mur isolant avec notre panneau et presque 3 °C avec le mur d'inertie.

Ces résultats démontrent l'importance de l'interaction entre le choix des matériaux de construction et l'intégration de solutions passives ou semi-actives de régulation thermique. Dans le contexte climatique d'Adrar, la combinaison d'une isolation efficace et d'un système de plafond rafraîchissant constitue une stratégie optimale pour maintenir une température intérieure stable et confortable, tout en limitant potentiellement les besoins en climatisation mécanique.

Tableau 07 : Résultats obtenus †

Résultat obtenu :

bejaia	Mechria	Adrar	Ouargla	Ghardaia	
--------	---------	-------	---------	----------	--

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

type A	T amb	20.43_32.89	21.5_41	28.66_46.33	27.43_49.11	28.4_45.46
	T int sans plafond	27.51_31.83	29.25_36.21	33.2_37.54	36.16_42.7	34.73_41.11
	T int avec plafond	24.79_27.89	23.6_28.24	27.6_30.82	27.4_31.9	26.55_30.97
type B	T int sans plafond	28.23_32.21	30.19_36.28	36.96_41.11	36.58_42.38	37.26_40.92
	T int avec plafond	24.73_27.54	23.17_27.33	26.37_29.39	26_29.91	25.52_29.39
type C	T int sans plafond	26.4_31.06	27.74_35.81	36.1_40.83	35.64_43.04	33.99_41.25
	T int avec plafond	25_28.77	24.43_31.06	30.48_34.12	30.16_35.72	28.89_34.43

6.

Comparaison

des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « A » :

Le tableau 08 présente les températures ambiantes et intérieures du bureau avec et sans système de rafraîchissement ainsi que la différence entre les deux avec le mur type «A ».

Tableau 08 : Comparaison des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « A »

	Bejaia	Mechria	Adrar	Ouargla	Ghardaia
Tamb (°C)	32.89	41.01	46.33	49.11	45.46
Tint du bureau sans PR (°C)	29.73	33.23	35.37	39.81	38.48
Tint de bureau avec PR (°C)	26.17	26.21	29.07	29.66	28.94
Δ T san et T avec PR (°C)	3.56	7.02	6.3	10.15	9.54

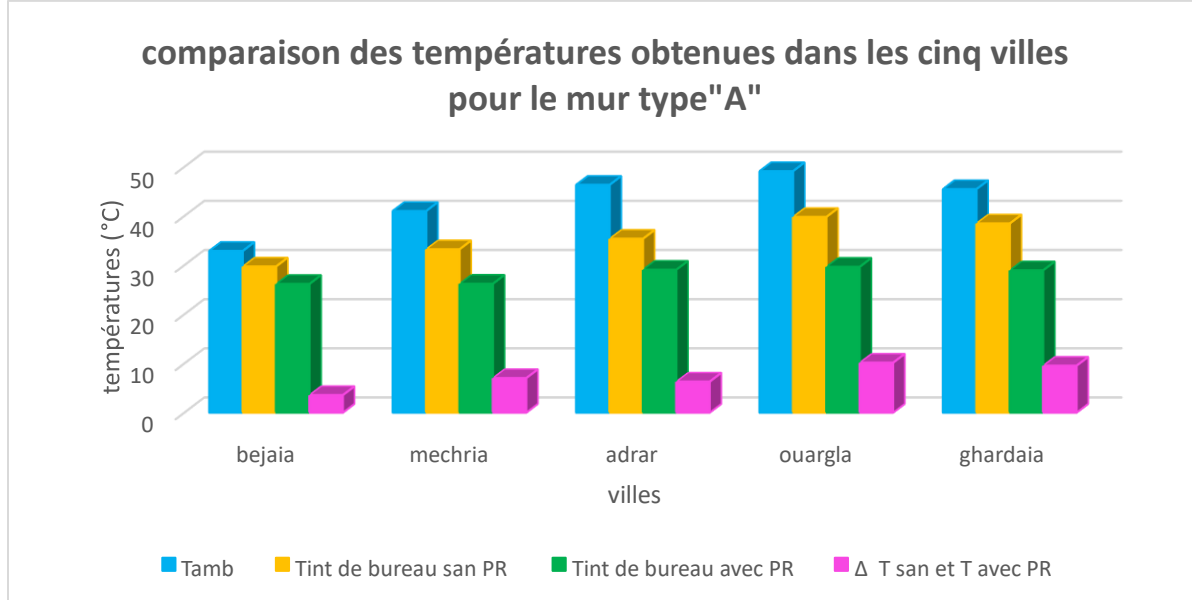


Figure 44 comparaison des résultats pour toutes les villes pour le mur type « A »

L'histogramme illustre l'impact du système de refroidissement par plafond rafraîchissant (panneau radiant) sur la température intérieure maximale du bureau atteinte dans les cinq wilayas représentatives : Béjaïa (zone E1), Méchria (zone E2), Adrar (zone E5), Ouargla (zone E4) et Ghardaïa (zone E3). La structure de l'enveloppe est composée d'un mur simple en double brique séparé par une lame d'air de 5cm.

Les barres bleues indiquent les températures ambiantes maximales représentant les conditions climatiques extrêmes. Les températures intérieures obtenues du bureau sans plafond rafraîchissant (barres jaunes) montrent des températures intérieures plus basses par rapport à celles de l'extérieures mais qui restent loin des températures du confort thermique.

Pour la wilaya de Bejaia, la température intérieure maximale est de 29°C, ceci est dû aux conditions météorologiques de la région (la température ambiante qui est tempérée et avoisine les 33°C). Concernant les autres villes la température intérieure du bureau a dépassé les 33°C avec un maximum de 39.81°C à Ouargla reflétant le climat semi-aride, aride et désertique des régions avec températures ambiantes maximales qui vont de 41,46, 45 et 50 °C à Mechria, Adrar et Ghardaïa et Ouargla.

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

L'ajout d'un plafond rafraîchissant (barres vertes) démontre une réduction significative de la température intérieure, ramenant les valeurs proches de 26–29 °C selon la wilaya. Cette amélioration est particulièrement marquée dans les zones du sud étant les villes les plus chaudes, avec une baisse maximale de plus de 10 °C à Ouargla (barre rose, représentant la différence entre la température du bureau avec et sans plafond rafraîchissant).

Ce graphique met en évidence l'efficacité notable du plafond rafraîchissant dans l'amélioration du confort thermique estival, même en présence d'une enveloppe relativement simple.

7. Comparaison des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « B » :

Le tableau 09 présente les températures ambiantes et intérieures du bureau avec et sans système de rafraîchissement ainsi que la différence entre les deux avec le mur type «B ».

Tableau 09 : Comparaison des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « B »

	Bejaia	Mechria	Adrar	Ouargla	Ghardaia
Tamb (°C)	32.89	41.01	46.33	49.11	45.46
Tint du bureau sans PR (°C)	30.32	33.71	39.08	39.81	38.54
Tint de bureau avec PR (°C)	25.99	25.5	27.78	27.93	27.57
Δ T san et T avec PR (°C)	4.33	8.21	11.31	11.88	10.97

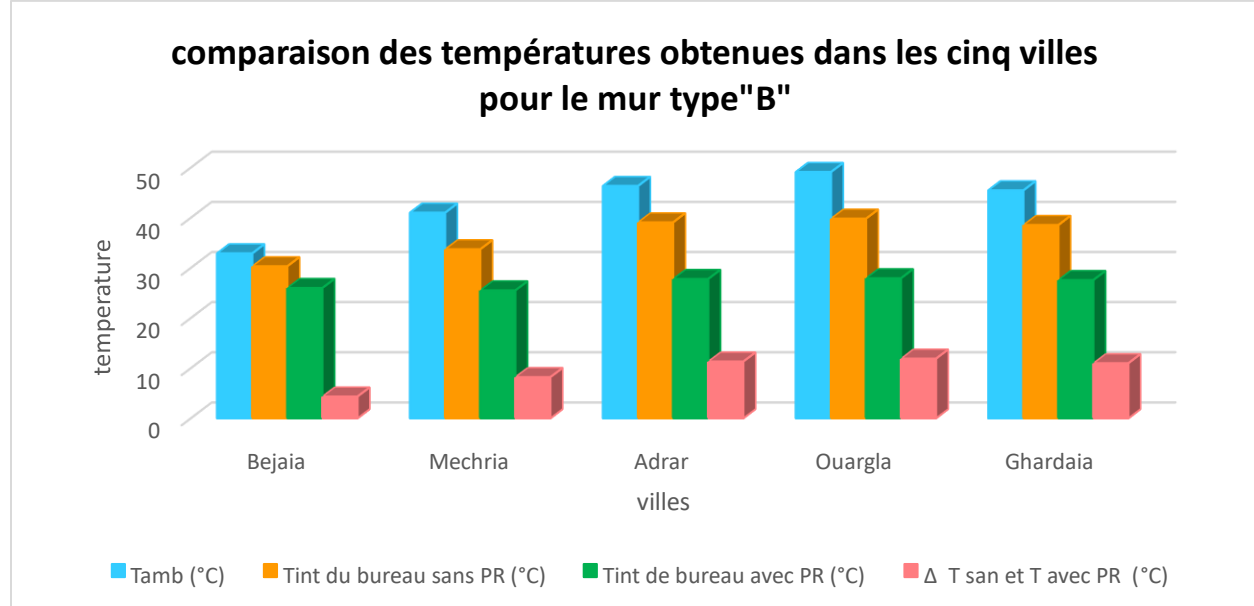


Figure 45 : Comparaison des résultats pour toutes les villes avec le mur type « B »

L'histogramme illustre l'impact du système de refroidissement par plafond rafraîchissant (panneau radiant) sur la température intérieure maximale atteinte dans le bureau dans les cinq wilayas représentatives : Béjaïa (zone E1), Méchria (zone E2), Adrar (zone E5), Ouargla (zone E4) et Ghardaïa (zone E3). La structure de l'enveloppe est composée d'un mur double brique séparé par 5cm de polystyrène extrudé mur (type B), optimisé pour améliorer la performance thermique du bâtiment.

Les barres bleues indiquent les températures ambiantes maximales représentant les conditions climatiques extrêmes. Les températures intérieures obtenues dans le bureau sans plafond rafraîchissant (barres jaunes) sont assez importantes avec un minimum qui frôle 33°C, à Béjaïa et des températures qui sont supérieures aux seuils du confort thermique, en particulier dans les zones sahariennes.

À Béjaïa, la température intérieure maximale atteint 30.32 °C à cause du climat modéré de la région, avec une température ambiante avoisinant les 33 °C. En revanche, pour les autres villes, les températures intérieures du bureau sans plafond rafraîchissant dépassent les 33 °C, atteignant un maximum de 39.81 °C à Ouargla, reflétant le climat aride et désertique de ces régions. Ces villes affichent des températures ambiantes extrêmes de 41 à plus de 49 °C, confirmant les contraintes climatiques sévères du sud algérien.

Chapitre 4:

Résultat et interprétation

L'ajout du plafond rafraîchissant (barres vertes) a permis une réduction significative des températures intérieures, ramenant celles-ci entre 25.5 et 27.9 °C selon la wilaya. Cette amélioration est particulièrement marquée dans les régions sahariennes, avec une baisse maximale de 11.88 °C à Ouargla (barres roses, représentant la différence entre la température sans et avec plafond rafraîchissant).

Ce graphique met en évidence l'efficacité notable du plafond rafraîchissant qui a pu réduire la température même avec une isolation performante et dans les conditions climatiques les plus extrêmes.

Il souligne l'intérêt de recourir à une isolation plus performante et / ou son emplacement. On note que la température du bureau sans rafraîchissement avec le mur type B était plus grande que celle obtenue avec le mur type, alors que la température intérieure du bureau rafraîchi était plus basse avec le mur type B (l'isolant a empêché un transfert thermique entre l'intérieure et l'extérieure).

7. Comparaison des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « C » :

Le tableau 42 présente les températures ambiantes et intérieures du bureau avec et sans système de rafraîchissement ainsi que la différence entre les deux avec le mur type «C ».

Tableau 10 : Comparaison des températures obtenues dans les cinq villes avec le mur type « C »

	Bejaia	Mechria	Adrar	Ouargla	Ghardaia
Tamb (°C)	32.89	41.01	46.33	49.11	45.46
Tint du bureau sans PR (°C)	28.74	32.18	38.27	39.68	38.37
Tint de bureau avec PR (°C)	26.61	27.7	31.95	32.98	32.13
Δ T san et T avec PR (°C)	2.13	4.48	6.32	6.7	6.24

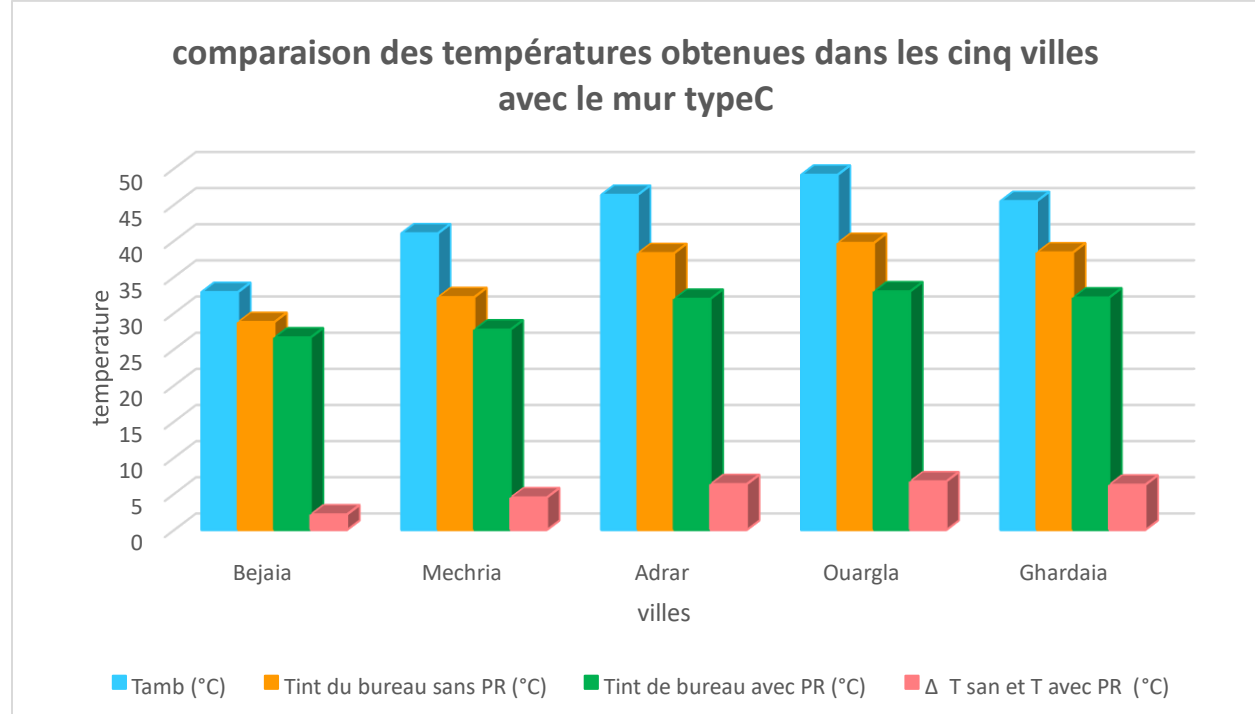


Figure 46 : comparaison des résultats pour toutes les villes avec le mur type « C »

L'histogramme illustre l'impact du système de refroidissement par plafond rafraîchissant (panneau radiant) sur la température intérieure maximale du bureau atteint dans les cinq villes représentatives de chaque zone climatique : Bejaïa (zone E1), Méchria (zone E2), Adrar (zone E5), Ouargla (zone E4) et Ghardaïa (zone E3). La structure de l'enveloppe est composée d'un mur en terre cuite (mur type C), matériau traditionnellement utilisé pour ses propriétés thermiques inertielles.

Les barres bleues indiquent les températures ambiantes maximales représentant les conditions climatiques extrêmes. Les températures intérieures enregistrées dans le bureau sans plafond rafraîchissant (barres jaunes) sont légèrement inférieures aux températures extérieures, mais restent au-dessus du seuil de confort, notamment dans les zones sahariennes.

À Béjaïa, la température intérieure maximale est de 28.74 °C, ce qui reste relativement proche du confort thermique grâce au climat tempéré. Cependant, dans les autres villes, notamment Adrar, Ghardaïa et Ouargla, les températures intérieures atteignent 38 et 40 °C, soulignant l'impact du climat sec et aride de la région malgré la masse thermique du mur en terre cuite.

L'introduction du plafond rafraîchissant (barres vertes) améliore sensiblement les performances, ramenant la température intérieure entre 26.6 °C et 32.9 °C. La baisse maximale de température atteint 6.7 °C à Ouargla (barres roses).

Le panneau radiant rafraichissant a fait baisser la température intérieure de 6 °C dans les régions du sud, atteignant 32 °C. Des températures qui sont au-dessus des autres températures résultantes avec les autres configurations des murs. Mettant en évidence l'inertie thermique du matériau de construction.

Synthèse des résultats

La lecture et l'interprétation des graphes et des histogrammes permettent de dire que :

- Le mur isolant (type B) offre les meilleures températures intérieures avec le système de rafraichissement mais les plus importantes sans le panneau radiant. les températures intérieures du bureau avec le système de rafraichissement atteignant un minimum de 25.5 °C à Mechria, et une réduction thermique maximale de près de 11.88 °C à Ouargla.
- Le mur simple en double brique (type A) présente des performances intermédiaires, avec des températures légèrement supérieures à celles du mur isolant, mais une baisse tout de même significative grâce au plafond rafraîchissant (jusqu'à 10.15 °C à Ouargla).
- Le mur en terre cuite (type C), présente des températures importantes avec ou sans système de rafraichissement comparé aux autres murs (types A et B) à cause de son inertie thermique. Toujours est-il, le panneau rafraichissant a pu réduire la température intérieure du bureau de 6.7°C.
- L'utilisation du panneau radiant rafraichissant a pu réduire la température intérieure du bureau dans les différentes zones climatiques et avec les différents murs (matériaux de construction), mettant en évidence sa performance.

Mur Type A – Double brique avec lame d'air

Le mur de type A, constitué de deux parois de brique séparées par une lame d'air de 5 cm, représente une solution standard fréquemment utilisée dans les constructions traditionnelles. Lors des simulations, ce mur a montré une performance thermique intermédiaire : sans plafond rafraîchissant, les températures intérieures dépassent souvent les 35 à 40 °C dans les zones

sahariennes, engendrant un inconfort thermique marqué. La lame d'air joue un rôle partiel d'isolant, en ralentissant la transmission de chaleur par conduction, mais sa faible capacité d'opposition aux flux thermiques limite son efficacité dans les environnements extrêmes. L'ajout du plafond rafraîchissant améliore significativement la situation, en réduisant la température intérieure de 7 à 10 °C selon la région, ramenant les valeurs autour de 27 à 31 °C. Cette combinaison permet de stabiliser la température intérieure durant les heures de forte chaleur, bien que la capacité de rétention thermique du mur reste insuffisante à elle seule. Ainsi, le comportement thermique du mur type A met en lumière l'importance d'un système de régulation actif pour compenser une enveloppe peu performante, en particulier dans les zones où l'écart entre les températures jour/nuit est faible et la demande en confort thermique élevée.

Mur Type B – Mur isolant avec polystyrène extrudé

Le mur de type B, composé de deux briques séparées par un isolant performant (polystyrène extrudé), se distingue nettement comme la solution la plus efficace du point de vue thermique. Grâce à sa conductivité très faible ce matériau réduit fortement les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur, limitant considérablement les apports de chaleur durant les périodes de canicule. Dans les simulations, ce mur a permis de maintenir des températures intérieures plus basses même sans plafond rafraîchissant, bien que dans les zones désertiques, les limites de l'enveloppe seule aient été atteintes. Avec l'ajout du plafond rafraîchissant, la température intérieure se stabilise autour de 25 à 29 °C, y compris lorsque les températures extérieures dépassent les 49 °C. La synergie entre l'enveloppe isolée et le plafond rafraîchissant est manifeste : l'isolant bloque efficacement la chaleur, ce qui permet au système de plafond de fonctionner de manière plus ciblée et avec moins d'efforts pour atteindre le confort thermique. De plus, l'isolation contribue à la stabilité de la température intérieure, en réduisant les variations et en atténuant les pics. C'est cette combinaison entre résistance thermique élevée et inertie de régulation du système actif qui explique la performance exceptionnelle du mur de type B, particulièrement adaptée aux environnements extrêmes.

Mur Type C – Mur en terre cuite pleine (forte inertie)

Le mur de type C est constitué d'une paroi massive en terre cuite pleine de 40 cm d'épaisseur, un matériau traditionnellement utilisé dans les régions chaudes pour sa forte inertie thermique.

Ce mur se comporte comme un régulateur passif des variations de température : il absorbe la chaleur le jour et la restitue lentement la nuit. Cette capacité à lisser les pics thermiques constitue un avantage dans les régions à forte amplitude thermique, mais devient une limite lorsque les températures restent élevées jour et nuit, comme dans les villes du sud algérien. Les résultats ont montré que sans système de rafraîchissement, la température intérieure restait relativement élevée, entre 34 °C et 42 °C selon la ville, en raison de la chaleur accumulée dans la masse du mur. Avec l'intégration du plafond rafraîchissant, une réduction de 4 à 7 °C est observée, mais cette performance reste inférieure à celle obtenue avec le mur isolé, car l'inertie thermique freine également la capacité du système actif à rafraîchir rapidement l'espace. Ce décalage temporel de réponse thermique, dû à la capacité du mur à stocker la chaleur, limite l'efficacité instantanée du refroidissement. Néanmoins, ce type de mur reste pertinent dans des régions où l'alternance jour-nuit permet au mur de se décharger naturellement. En somme, le mur en terre cuite offre une solution passable, mais qui nécessite un couplage avec un système de régulation bien calibré pour exprimer tout son potentiel dans les contextes extrêmes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion Générale

Face à une demande croissante de confort thermique dans un contexte de réchauffement climatique et de pression énergétique, notamment en Algérie, l'optimisation des performances thermiques des bâtiments devient un enjeu stratégique. Ce mémoire a permis d'évaluer de manière comparative l'efficacité du plafond rafraîchissant intégré à différentes configurations murales dans cinq zones climatiques algériennes. Les résultats confirment que le système de plafond rafraîchissant, lorsqu'il est bien dimensionné, peut apporter une réduction significative de la température intérieure, allant jusqu'à 13 °C, en fonction du type de mur et de la région. Toutefois, l'efficacité globale du dispositif dépend fortement de la qualité de l'enveloppe du bâtiment. Le mur isolant, grâce à sa très faible conductivité, permet au plafond de fonctionner à pleine capacité, offrant un confort optimal même en conditions extrêmes. Le mur en double brique, malgré une amélioration grâce au plafond, reste limité par son isolation modeste. Quant au mur en terre cuite, il bénéficie d'une bonne inertie thermique, mais présente un temps de réponse lent qui peut nuire à la régulation thermique rapide attendue. Cette étude souligne ainsi que le plafond rafraîchissant seul ne suffit pas : son efficacité repose sur une conception cohérente et adaptée de l'ensemble du bâtiment. Il est donc essentiel de combiner intelligemment des solutions passives (enveloppe performante, protections solaires, ventilation naturelle) et semi-passives (plafond rafraîchissant) pour construire des bâtiments résilients, durables et adaptés aux défis climatiques futurs. Ce travail apporte ainsi une contribution concrète à la transition énergétique du secteur du bâtiment en Algérie.

Perspectives de recherches

Ce travail ouvre plusieurs pistes de recherche prometteuses en lien avec le rafraîchissement par plafond radiant et l'optimisation énergétique des bâtiments dans les climats chauds. Une première perspective consisterait à élargir l'étude à d'autres typologies de bâtiments, tels que les établissements scolaires, hospitaliers ou résidentiels, afin d'évaluer la transférabilité des résultats obtenus dans un bureau type. Il serait également pertinent de combiner le plafond rafraîchissant avec d'autres systèmes passifs, comme les murs Trombe, les toitures végétalisées

Conclusion générale

ou les puits canadiens, pour concevoir des stratégies hybrides à plus faible empreinte énergétique.

D'un point de vue technologique, une évolution naturelle serait l'intégration de la régulation intelligente, via des capteurs d'humidité, de température et de présence, couplés à des systèmes domotiques permettant d'adapter en temps réel les paramètres de fonctionnement du plafond (température et débit d'eau). Par ailleurs, des recherches pourraient être menées sur l'utilisation de sources de froid renouvelables, telles que la géothermie ou le refroidissement solaire, pour alimenter les plafonds rafraîchissants tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles.

Enfin, une extension de la modélisation à l'échelle annuelle, prenant en compte les effets de l'humidité relative, les risques de condensation et les coûts énergétiques cumulés, permettrait d'approfondir l'analyse en termes de performance globale, de confort longue durée et de rentabilité. Une analyse environnementale en cycle de vie pourrait également compléter cette étude pour évaluer l'impact écologique global de ce système innovant.

Références bibliographiques :

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

1. **Andrés-Chicote, M., Sendra, J. J., & Reig, A. (2012).** Experimental evaluation of a ceiling radiant cooling panel system: Thermodynamic behaviour and cooling capacity under different operating conditions. *Energy and Buildings*, 54, 207–216.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.020>
2. **Amini, M., El Aoufi, L., & Bouayad, A. (2020).** Les déterminants institutionnels de la création d'entreprise au Maroc: Une analyse qualitative. *Revue Marocaine de Recherche en Management et Marketing*, (24), 31–45.
3. **Bogatu, D.-I., Negru, V., & Petrusel, R. (2021).** Improving requirement specification quality through defect-based guided inspection. *Requirements Engineering*, 26(3), 341–357. <https://doi.org/10.1007/s00766-020-00342-7>
4. **Catalina, T., Virgone, J., & Blanco, E. (2010).** Study of the performance of a radiant cooling ceiling system integrated with a displacement ventilation system. *Building and Environment*, 45(2), 376–388. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.017>
5. **Cholewa, T., Siuta-Olcha, A., & Wróbel, M. (2017).** Heat transfer coefficients for ceiling radiant heating and cooling systems. *Energy and Buildings*, 152, 573–583.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.047>
6. **Imanari, T., Omori, T., & Bogaki, K. (1999).** Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. *Energy and Buildings*, 30(2), 167–175.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00084-9)
7. **Li, R., Zhang, G., & Asada, H. (2014).** Thermal performance evaluation of ceiling radiant cooling panels in a low-energy building in Tokyo. *Energy and Buildings*, 68(PA), 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.045>
8. **Ma, L., Zhang, T., & Zhang, X. (2010).** Development and experimental study of a novel ceiling radiant cooling panel with condensate removal. *Energy and Buildings*, 42(11), 2118–2125. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.06.006>
9. **Radwan, A., El-Maghlany, W., & Hamed, A. (2021).** Development and CFD analysis of multi-segmented mini-channel radiant panels for improved thermal comfort and energy performance. *Renewable Energy*, 170, 1075–1088.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.093>
10. **Shin, M. S., Lee, D. W., & Kim, Y. (2018).** Cooling performance of open-type ceiling radiant panels: An experimental study. *Building and Environment*, 144, 501–510.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.042>
11. **Shinoda, J., Nakamura, T., & Yamaguchi, T. (2022).** Evaluation of plenum influence on radiant ceiling panel cooling performance and proposal of improved test method. *Energy and Buildings*, 258, 111843. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111843>
12. **Valdiserri, P., Manfren, M., & Azzali, S. (2020).** Simulation of thermal comfort in hospital rooms with ceiling radiant panels. *Energy Procedia*, 158, 2522–2527.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.926>
13. **Wojtkowiak, J., Ryzek, M., & Kulesza, T. (2019).** Multi-agent reinforcement learning for smart grid energy management. *Applied Energy*, 235, 1444–1453.

Références bibliographiques :

- <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.074>
14. **Ye, M., & Tanabe, S. (2021).** Experimental investigation of a concave-surface ceiling radiant cooling panel. *Energy and Buildings*, 242, 110962.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110962>
15. **W.F. Mahmoudche, M. Ben Azza, S.Derbal, A.K. Hamid, R. Kharchi.** A study of thermal behavior of radiant cooling ceiling in a house located in south of Algeria (EL-Oued). Springer Nature. Technological and innovate progress in renewable energy systems. 2024.
16. **W.F. Mahmoudche, D.Lafri, R.kharchi, A .Hamid et D. Semmar.** Study of the thermal behavior of a radiant cooling panel in different climatic zones of Algeria. 2025

