



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Année:

N° d'enregistrement

Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière
Département de Physique

THESE

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences

Spécialité : Physique Énergétique

Présentée par :

NECIB Hichem

Thème

**Effet des conditions périodiques sur la précision des résultats
numériques des problèmes de transfert thermique
instationnaire : Cas de l'étude d'une isolation thermique**

Soutenue publiquement le : ...05 .../...04.../...2021..

Devant le Jury composé de :

Mr. Slimane BOUGHALI	Professeur	U.K.M Ouargla	Président
Mr. Ali BOUCHOUCHA	Professeur	UFMC1 Constantine	Examineur
Mr. Nacer CHOUCANE	MCA	U.M.K Biskra	Examineur
Mr. Yacine MARIF	MCA	U.K.M. Ouargla	Examineur
Mr. Djamel MANOUCHE	MCA	U.K.M. Ouargla	Examineur
Mr. Brahim NECIB	Professeur	UFM1 Constantine	Rapporteur

Année Universitaire : 2020-2021

إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات وبتوفيقه تتحقق المقاصد والغايات والذي قال في كتابه **"يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ"** (سورة المجادلة: 11) وأصلي وأسلم على معلم البشرية جمعاء محمد صلى الله عليه وسلم والذي حُبب إلينا العلم والعلماء حيث قال **"إِنَّ الْعُلَمَاءَ هُمْ وَرَثَةُ الْأَنْبِيَاءِ، إِنْ الْأَنْبِيَاءَ لَمْ يُوْرثُوا دِينَاراً وَلَا دِرْهماً، إِنما وَرثُوا الْعِلْمَ فَمَنْ أَخَذَهُ أَخَذَ بِحِظِّ وَافِرٍ"** صحيح ابن ماجه وبعد:

أهدي هذا العمل المتواضع:

- ❖ لأمي وأبي الغاليين الذين تعبوا في تربيئنا وتوجيهنا، فاللهم ارحمها كما ربياني صغيرا
- ❖ لزوجتي الفاضلة التي كانت سندا لي في السراء والضراء
- ❖ لعمي ابراهيم الذي لم يبخل علي يوما بنصائحه القيمة، نظرا لخبرته الكبيرة في مجال البحث العلمي والتعليم
- ❖ لأبنائي جميعا، حفصهم الله وسدد خطاهم
- ❖ لإخوتي وأخواتي، رعاهم الله وأصلح أولادهم
- ❖ لكل العائلة الكريمة
- ❖ لكل أصدقائي وأحبابي
- ❖ لكل من علمني حرفا ولكل من دعا لي

كما أعتذر عن كل تقصير أو خطأ في هذه المذكرة. حيث أن كل كاتب يعتذر في مقدمة كتابه عن الخطأ والنسيان إلا كتاب الله فإنه يبدأ بقوله تعالى: **"الم (1) ذَلِكَ الْكِتَابُ لَا رَيْبَ فِيهِ هُدًى لِلْمُتَّقِينَ (2)"** سورة البقرة.

نصيب هشام

Remerciements

En premier lieu, Je tiens à remercier Dieu, qui nous a donné la force et la persévérance pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce document.

Je voudrais aussi remercier, mon directeur de thèse Mr.NECIB Brahim, professeur à l'université UFMC1 de Constantine, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à l'amélioration de cette étude.

Je remercie également tous les membres de jury, qui nous ont honorés en acceptant la lecture et la correction de notre thèse, commençant par le président : Mr. Slimane BOUGHALI de l'université de Ouargla, ainsi que les examinateurs : Mr. Ali BOUCHOUCHA de l'université de Constantine, Mr. Nacer CHOUCANE de l'université de Biskra, Mr. Djamel MANOUCHE et Mr. Yacine MARIF de l'université de Ouargla,

Enfin, je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à mes collègues Mr KADRI Farid et Mr MELHEGUEG Nacer et à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'amélioration de ce modeste travail.

SOMMAIRE

إهداء.....	I
Remerciements	II
Sommaire.....	III
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux	VIII
Nomenclature.....	IX
ملخص.....	XII
Résumé	XIII
Abstract.....	XIV
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	
I.1. Introduction :	5
I.2. Choix du jour type :	5
I.2.1. Collecteur photovoltaïque thermique (PV/T) :	5
I.2.2. Panneaux solaire CSP (Concentrated solar power) :	6
I.2.3. Cheminée solaire :	7
I.2.4. Cheminée solaire utilisée pour la ventilation naturelle des habitats :	8
I.3. Optimisation de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments :	8
I.3.1. Un jour typique pour toute la période étudiée :	9
I.3.2. Un jour typique pour chaque mois de la période étudiée :	14
I.4. Effet des conditions initiales sur la précision des résultats :	15
I.5. Conclusion :	17
CHAPITRE II : OPTIMISATION DE L'ISOLATION THERMIQUE DES BATIMENTS	
II.1. Introduction :	19
II.2. Isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment.....	19
II.3. Calcul des charges de climatisation ou de chauffage annuelles :	20
II.3.1. Régime permanent :	20
a) Méthode degrés-jours :	20
b) Méthode degrés-heures :	21
II.3.2. Température Sol-Air :	22

II.3.3. Régime transitoire (modèle thermique dynamique) :	22
II.4. Analyse économique.....	23
II.4.1. Analyse des Coûts du Cycle de Vie (ACCV) :.....	25
II.4.2. Méthode P1 –P2 :	28
II.5. Conclusion :	29
CHAPITRE III : MÉTHODES NUMÉRIQUES ET VALIDATION DU PROGRAMME	
III.1. Introduction :	31
III.2. Formulation mathématique.....	31
III.3. Résolution du système d'équation :	34
III.3.1. Elimination de Gauss Jordan (pivot de Gauss).....	34
III.3.2. Décomposition LU	35
III.3.3. Méthode de Gauss-Seidel (méthodes itératives) :	36
III.4. Choix de la méthode de résolution du système d'équation linéaire :	38
III.5. Organigramme du programme :	41
III.6. Validation du code de calcul :	43
III.7. Conclusion :	45
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	
IV.1. Introduction :	47
IV.2. Géométrie et conditions aux limites :	47
IV.3. Période de calcul :.....	49
IV.4. Procédure de calcul.....	50
IV.5. Résultats et discussions :	51
IV.5.1. Données Météorologiques Réelles (DMR)	51
IV.5.2. Conditions périodiques :.....	57
a) Effets des conditions périodiques sur les résultats (15 ou 21 Juillet comme jour type) :	58
b) Effets des conditions initiales sur les résultats :	61
IV.6. Amélioration des résultats par l'utilisation de l'algorithme FFT :	70
IV.6.1. Théorème de Fourier :	70
IV.6.2. Analyse spectrale de la température Sol-Air :	71
IV.7. Etude comparative de nos résultats avec d'autres études :	79

IV.7.1. Comparaison avec différentes régions caractérisées par un climat chaud : ..	79
IV.7.2. Effet de l'orientation du mur sur l'optimisation de l'épaisseur d'isolation pour différentes régions :	81
IV.8. Conclusion :	83
CONCLUSION GENERALE	85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	89

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

FIGURE I. 1 DIFFERENTES CONFIGURATIONS DU MUR MULTICOUCHE ETUDIEES PAR M OZEL ET K PIHTILI D'UN MUR EN BRIQUES OU BLOCS DE BETON AVEC LAINE DE VERRE OU LIEGE COMME ISOLANT (OZEL AND PIHTILI 2007)	11
FIGURE I. 2 MUR MULTICOUCHE ETUDIE PAR NAOUEL DAOUAS (DAOUAS 2011)	12
FIGURE I. 3 MUR MULTICOUCHE ETUDIE PAR RAMIN, HADI ET AL (RAMIN, HANAFIZADEH ET AL. 2016).....	13

CHAPITRE II : OPTIMISATION DE L'ISOLATION THERMIQUE DANS LES BATIMENTS

FIGURE II. 1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE POMPE A CHALEUR	24
FIGURE II. 2 DETERMINATION DE L'EPAISSEUR OPTIMALE DE L'ISOLATION SUR LA BASE DE COUT TOTAL MINIMUM (CENGEL, KLEIN ET AL. 1998)	25

CHAPITRE III : METHODES NUMERIQUES ET VALIDATION DU PROGRAMME

FIGURE III. 1 MAILLAGE D'UN MUR MULTICOUCHE UNIDIMENSIONNEL (NOMBRE DES COUCHES L=4)	32
FIGURE III. 2 COMPARAISON ENTRE DIFFERENTES METHODES DE RESOLUTION : GAUSS, LU ET GAUSS-SEIDEL	39
FIGURE III. 3 ORGANIGRAMME DU PROGRAMME DEVELOPPE	42
FIGURE III. 4 GEOMETRIE ET CONDITIONS AUX LIMITES DU PROBLEME UTILISE POUR LA VALIDATION DU CODE DE CALCUL.....	43
FIGURE III. 5 VALIDATION DU CODE DE CALCUL	45

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

FIGURE IV. 1 GEOMETRIE ET CONDITION AUX LIMITES DU MUR MULTICOUCHE.....	48
FIGURE IV. 2 CHARGES DE CLIMATISATION POUR CHAQUE MOIS CALCULEES PAR LA METHODE DEGRES-HEURES	50
FIGURE IV. 3 CHARGES DE CLIMATISATION MENSUELLES POUR LES QUATRE ORIENTATIONS D'UN MUR NON ISOLE.....	53
FIGURE IV. 4 CHARGES DE CLIMATISATION GLOBALES POUR LES QUATRE ORIENTATIONS DU MUR MULTICOUCHE.....	53
FIGURE IV. 5 COUTS DE L'ISOLATION, DE L'ENERGIE UTILISEE PAR LA CLIMATISATION ET DU COUT TOTAL POUR UN MUR ORIENTE VERS L'EST	54
FIGURE IV. 6 VARIATION DU COUT TOTAL PAR RAPPORT A L'EPAISSEUR D'ISOLATION POUR TOUTES LES ORIENTATIONS DE MUR.....	55
FIGURE IV. 7 CHARGES MENSUELLES DE CLIMATISATION, SANS ET AVEC UNE EPAISSEUR D'ISOLATION OPTIMALE, DES QUATRE ORIENTATIONS	56
FIGURE IV. 8 ENERGIE ECONOMISEE POUR TOUTES LES ORIENTATIONS DES MURS.....	57
FIGURE IV. 9 TEMPERATURE AMBIANTE DE L'AIR DU 15 ET DU 21 JUILLET	58
FIGURE IV. 10 RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL POUR TOUTES LES ORIENTATIONS DU 15 ET DU 21 JUILLET	59
FIGURE IV. 11 TEMPERATURE SOL-AIR POUR L'ORIENTATION EST DU 15 ET DU 21 JUILLET	59
FIGURE IV. 12 CHARGES DE CLIMATISATION ANNUELLES POUR LE MUR D'ORIENTATION EST.....	60
FIGURE IV. 13 COUT DE L'ENERGIE CONSOMMEE PAR LA CLIMATISATION POUR L'ORIENTATION EST	61
FIGURE IV. 14 CHARGES DE CLIMATISATION GLOBALES POUR DIFFERENTS CRITERES DE STABILITE	63
FIGURE IV. 15 CHARGES DE CLIMATISATION GLOBALES POUR UN MUR ORIENTE VERS L'EST	65

FIGURE IV. 16 COUT TOTAL POUR L'ORIENTATION EST	66
FIGURE IV. 17 CHARGES DE CLIMATISATION GLOBALES POUR TOUTES LES ORIENTATIONS, AVEC ET SANS TRAITEMENT DES CONDITIONS INITIALES, D'UN MUR AVEC UNE EPAISSEUR D'ISOLATION OPTIMALE	67
FIGURE IV. 18 EPAISSEUR OPTIMALE D'ISOLATION POUR TOUTES LES ORIENTATIONS AVEC ET SANS TRAITEMENT DES CONDITIONS INITIALES.....	68
FIGURE IV. 19 CHARGES DE CLIMATISATION GLOBALES D'UN MUR SANS ISOLATION ORIENTE VERS L'EST ET POUR DIFFERENTES REGIONS	69
FIGURE IV. 20 SPECTRES DE LA TEMPERATURE $T_{\text{SOL-AIR}}$ DE LA PERIODE ETUDIEE ENTRE LE 1^{ER} MAI JUSQU'A LE 31 OCTOBRE.....	71
FIGURE IV. 21 TEMPERATURES $T_{\text{SOL-AIR}}$ REELLE, CALCULEE PAR L'ALGORITHME FFT ET LA TEMPERATURE DE L'AIR AMBIANT POUR L'ORIENTATION EST.....	72
FIGURE IV. 22 TEMPERATURE $T_{\text{SOL-AIR}}$ DU 15, DU 21 JUILLET ET DU JOUR TYPE CALCULE PAR L'ALGORITHME FFT	73
FIGURE IV. 23 TEMPERATURE CALCULER PAR L'ALGORITHME FFT ET LA TEMPERATURE SOL-AIR DURANT SIX MOIS	74
FIGURE IV. 24 CHARGES DE CLIMATISATION GLOBALES DU MUR ORIENTE VERS L'EST.....	75
FIGURE IV. 25 CHARGES DE CLIMATISATION GLOBALES POUR LES DIFFERENTES ORIENTATIONS D'UN MUR SANS ISOLATION DANS LA REGION DE OUARGLA	76
FIGURE IV. 26 CHARGES DE CLIMATISATION GLOBALES POUR DIFFERENTES REGIONS D'UN MUR SANS ISOLATION ORIENTE VERS L'EST	77

Liste des tableaux

CHAPITRE III : MÉTHODES NUMÉRIQUES ET VALIDATION DU PROGRAMME

TABLEAU III. 1: TEMPS DE CALCUL D'ORDINATEUR POUR LES TROIS METHODES DE RESOLUTION (LU, GAUSS ET ITERATIVE):.....	40
TABLEAU III. 2: CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DU MUR MULTICOUCHE	44

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

TABLEAU IV. 1: CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION	48
TABLEAU IV. 2: PARAMETRES UTILISES DANS LES CALCULS	49
TABLEAU IV. 3: EFFET DU CRITERE DE STABILITE DES CONDITIONS INITIALE SUR LES RESULTATS	62
TABLEAU IV. 4: RESULTATS POUR DIFFERENTES ORIENTATIONS DU MUR.....	78
TABLEAU IV. 5: COMPARAISON AVEC DES ETUDES PRECEDENTES POUR DES CLIMATS CHAUDS	80
TABLEAU IV. 6: EFFET DE L'ORIENTATION DU MUR SUR L'OPTIMISATION DE L'ÉPAISSEUR D'ISOLATION POUR DIFFERENTES REGIONS	82

Nomenclature

a	Diffusivité thermique (m^2/s)
ACCV	Analyse des Coûts du Cycle de Vie (Life-Cycle Cost Analysis)
A_{Es}	Énergie économisée ($\$/m^2$ année)
C	Chaleur spécifique (J/kg K)
C_c	Coût annuel d'énergie consommée par la climatisation ($\$/m^2$ année)
C_e	Coût de l'électricité ($\$/kWh$)
C_i	Coût du matériau d'isolation ($\$/m^3$)
COP	Coefficient de performance pour une pompe à chaleur
C_t	Coût total ($\$/m^2$)
d	Taux d'inflation (%)
FFT	Fast Fourier Transform
h_o	Coefficient d'échange thermique à la surface extérieur du mur multicouche (W/m^2K)
h_i	Coefficient d'échange thermique à la surface intérieur du mur multicouche (W/m^2K)
i	Taux d'intérêt (%)
$I_T(t)$	Rayonnement solaire global en fonction du temps (W/m^2)
k	Conductivité thermique (W/mK)
L_i	Épaisseur de l'isolation (m)
L_{opt}	Épaisseur optimale de l'isolation (m)
MBE	Erreur de biais moyenne (Mean Bias Error)
Ms	Rapport des coûts d'entretien, d'assurance et d'autres frais, par rapport au premier coût
n	Durée de vie (années)
P1	Rapport des couts ; de l'énergie durant le cycle de vie et le coût de l'énergie de la première année.
P2	Rapport entre les dépenses supplémentaires, au cours du cycle de vie du bâtiment, et l'investissement initial.
PWF	Facteur de la valeur actuelle (Present Worth Factor)

P_b	Délai de récupération (années)
q_o	Densité de flux de chaleur à travers la surface extérieure du mur multicouche (W/m^2)
q_i	Densité de flux de chaleur à travers la surface intérieure du mur multicouche (W/m^2)
Q_c	Charge de climatisation pour un mur isolé (MJ/m^2 années)
$Q_{c-unins}$	Charge de climatisation pour un mur non isolé (MJ/m^2 années)
Q_h	Chaleur transmise au réservoir chaud (J)
Q_c^{New}	Charges de climatisation calculées par l'itération actuelle (MJ/m^2 années)
Q_c^{Old}	Charges de climatisation calculées par l'itération précédente (MJ/m^2 années).
DMR	données météorologiques réelles
RMSE	Erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error)
R_v	Rapport de la valeur de revente par rapport au premier coût.
t	Temps (s)
t_i	Début de la période simulée
t_f	Fin de la période simulée
T_b	Température de base (très proche de la température de confort $T_b=291$ K).
T_{eh}	Température horaire moyenne de l'air extérieur (K).
T_{ej}	Température journalière moyenne de l'air extérieur (K).
T_{Es}	Coût total économisé pendant la durée de vie du bâtiment ($\$/m^2$)
T_i	Température de l'air ambiant à l'intérieur du bâtiment (K)
T_n^{New}	Température de la surface interne du mur multicouche calculée par l'itération actuelle (K)
T_n^{Old}	Température de la surface interne du mur multicouche calculée par l'itération précédente (K)
$T_o(t)$	Température de l'air extérieur en fonction du temps (K)
$T_{Sol-Air}(t)$	Température Sol-Air (K)
T_{wi}	Température de la surface interne du mur (K)
T_{wo}	Température de la surface externe de mur (K)
W	Travail du Compresseurs (MJ/m^2 années)

x_i	Température de la surface interne du mur, obtenue par Fluent ou CodyMur (K)
y_i	Température de la surface interne du mur, obtenue par notre code de calcul (K)
ρ	Masse volumique (kg/m ³)
α	Coefficient d'absorption solaire (égale à 0,8)
ε	Critère de stabilité
$\frac{\varepsilon \Delta R}{h_o}$	Facteur de correction ; allant de 0°C pour les murs verticaux à 4 °C pour les murs horizontaux
$\lambda = \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$	Rapport entre les pas ; du temps Δt et d'espace Δx

ملخص:

تمت دراسة تأثير الشروط الدورية والابتدائية على دقة حساب سمك العزل الأمثل عن طريق المحاكاة العددية لجدران المباني. في هذا السياق، تم تطوير كود عن طريق FORTRAN لحساب أحمال التبريد، سماكة العزل المثلى وزمن تسديد المصاريف خلال فترة الصيف في مدينة ورقلة وذلك باستعمال بيانات الأرصاد الجوية الحقيقية لمدة ستة أشهر. النتائج المتحصل عليها رقمياً بطريقة الفروق المنتهية من أجل أربعة اتجاهات مختلفة للجدار المتعدد الطبقات المدروس ومن أجل شروط دورية مختلفة (15 و 21 جويلية). مع اعتبار انتقال الحرارة عبر الجدار أحادي البعد كانت جد مرضية. تم عرض تأثير الاختيار بين 15 و 21 جويلية على وقت الحساب ودقة النتائج. من خلال مقارنة النتائج مع حالة الشروط الحقيقية، وجدنا أن وقت الحساب قد تم تقليصه بشكل كبير حتى 90.74% في حالتي 15 و 21 جويلية ولكن بدقة ضعيفة، خاصة في حالة اختيار 21 جويلية. كما تم تأكيد هذه الملاحظة لثلاث مناطق أخرى من الصحراء الجزائرية (ورقلة، أدرار وبشار). لمزيد من الدقة، تم اقتراح حساب درجة حرارة الهواء المسخن بأشعة الشمس ليوم نموذجي واحد، بناءً على البيانات المناخية للفترة المدروسة باستخدام Fast Fourier Transform (FFT) بهذه الطريقة تم التوصل إلى تقليص الفرق النسبي الأقصى لأحمال التبريد بالنسبة للاتجاهات الأربعة حتى 0.83%، مع وقت حسابي يبلغ 4.212 ساعة بدلاً من 45.505 ساعة. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة تأثير الشروط الابتدائية على دقة النتائج العددية لجميع حالات الشروط الدورية (15، 21 جويلية واليوم النموذجي المحسوب بطريقة FFT) وذلك في عدة مناطق مختلفة.

الكلمات المفتاحية: عزل حراري؛ سماكة العزل المثلى؛ الشروط الدورية؛ أحمال التبريد؛ طريقة الفروق المنتهية الضمنية.

Résumé :

Les effets des conditions périodiques et initiales sur la précision du calcul, par simulation numérique, de l'épaisseur optimale d'isolation des murs de bâtiments ont été étudiés. Dans ce contexte, un code de calcul a été développé en FORTRAN et validé pour calculer, sous des données Météorologiques Réelles (DMR), les charges de climatisation, l'épaisseur optimale d'isolation et la période de récupération, pendant la période estivale de la ville de Ouargla. Les résultats ont été déterminés pour différentes orientations de la paroi considérée et pour différentes conditions périodiques (différents jours type). Le transfert de chaleur instationnaire à travers le mur multicouche a été considéré comme unidimensionnel et le problème a été résolu numériquement par une méthode de différence finie implicite. Pour les conditions périodiques, l'effet du choix entre le 15 et le 21 juillet, comme jour typique, sur le temps de calcul et la précision des résultats a également été présenté. En comparant les résultats avec le cas des conditions réelles (DMR), il a été constaté que le temps de calcul a été considérablement réduit jusqu'à 90,74% pour les deux cas étudiés : 15 et 21 Juillet ; mais avec une mauvaise précision, surtout pour le choix du 21 juillet. Cette remarque a également été confirmée pour trois autres régions du Sahara Algérien (Ouargla, Adrar et Bechar). Pour plus de précision, un calcul de la température sol-air d'un jour typique, basé sur les données climatiques de l'ensemble de la période étudiée, à l'aide de l'algorithme de la Transformée Rapide de Fourier (FFT) a été proposé. Les résultats des charges de climatisation par cette méthode représentent une différence relative maximale, par rapport aux conditions réelles, de 0,83% des quatre orientations, avec un temps de calcul de 4,212 heures au lieu de 45,505 heures pour chaque orientation. De plus, l'influence des conditions initiales sur la précision des résultats numériques a également été étudiée pour tous les cas des conditions périodiques (15, 21 juillet et jour type calculé par la méthode FFT) et pour différentes régions.

Mots-clés : Isolation thermique ; épaisseur optimale d'isolation ; conditions périodiques ; charges de climatisation ; méthode des différences finies implicites.

Abstract:

The effects of periodic and initial conditions on the accuracy of calculation, by numerical simulation, of optimum insulation thickness of building walls have been studied. In this context, a computational FORTRAN code has been developed and validated to calculate, under a Real Meteorological Data (RMD), the cooling transmission loads and the optimum insulation thickness during the summer period in Ouargla, Algeria. The results have been determined for different orientations, of the considered wall, and for different periodic conditions. The unsteady heat transfer across the multilayer wall was considered as one-dimensional and the problem was solved numerically by an implicit finite difference method. For steady-periodic conditions, the effect of choosing between July 15 and July 21 as representative days on the calculation time and the accuracy of the results has been also presented. By comparing the results with the case of real conditions (RMD), it was found that the calculation time has been significantly reduced up to 90.74% for the two cases of July 15 and 21; but with poor accuracy, especially for the choice of July 21 as a typical day. This remark has been also confirmed for three other regions of the Algerian Sahara (Ouargla, Adrar, and Bechar). For more accuracy, a calculation of the air-sol temperature of one representative day, based on the climate data of the entire period studied using the Fast Fourier Transform (FFT) has been proposed. The results of cooling transmission loads by this method represent a maximum relative difference of 0.83% of the four wall orientations, with a computational time of 4.212 hours instead of 45.505 hours with the RMD conditions. Besides, the influence of the initial conditions on the precision of the numerical results has been also studied for all the cases of periodic conditions (July 15, 21, and typical day calculated by the FFT method) in several regions.

Keywords: Thermal insulation; optimum thickness; periodic conditions; cooling loads; implicit finite difference method.

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, l'augmentation de la population mondiale et le développement technologique et économique ont un impact direct sur l'augmentation de la consommation d'énergie. L'approvisionnement en énergie par des ressources propres et renouvelables reste faible, en plus, la plupart des ressources utilisées aujourd'hui sont épuisables et polluantes. Cela nécessite un contrôle de la consommation d'énergie afin d'assurer un approvisionnement à long terme avec la moindre pollution.

En Algérie, comme dans tous les pays du monde, le secteur du bâtiment représente plus de 40% de la consommation totale d'énergie [1-4], dont une grande partie d'elle est consommée par la climatisation ou le chauffage des bâtiments. Une installation d'une bonne isolation sur l'enveloppe des bâtiments réduit considérablement la consommation d'énergie dépensée pour avoir un certain confort en été comme en hiver. D'une part, une épaisseur élevée de l'isolant réduit la consommation d'énergie mais, d'autre part, le coût de l'isolation sera augmenté, ce qui nécessite une optimisation.

Dans la littérature on trouve plusieurs méthodes utilisées pour calculer les charges de refroidissement et de chauffage afin d'optimiser l'épaisseur de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments. Parmi lesquelles on trouve des méthodes simples et rapides telles que les degrés-jours et les degrés-heures ou des méthodes complexes et plus précises tel que les modèles thermiques dynamiques. La précision du calcul de l'épaisseur optimale d'isolation est très importante car l'erreur de calcul engendre une consommation d'énergie excessive si l'épaisseur de l'isolant est sous-estimée ou des dépenses supplémentaires si l'épaisseur de l'isolant est surestimée.

La période pour laquelle les charges de climatisation ou de chauffage sont calculées est relativement longue (une année ou une saison). Pour les méthodes dynamiques, le calcul de ces charges pour toute la période étudiée engendre un temps de calcul excessif. L'utilisation d'une condition périodique (un seul jour type de 24 heures) à la place des conditions météorologique de la période réelle (des centaines de jours, c.à.d. simulé des milliers d'heures) est une approche utilisée par toutes les études antérieures. La plupart des études qui ont utilisé des modèles thermiques dynamiques pour calculer les charges de chauffage et / ou de refroidissement ont

choisi le 15 juillet et le 15 janvier ou le 21 juillet et le 21 janvier comme un jour typique pour l'étude de la période estivale et hivernale respectivement. Aucune de ces études n'a justifié scientifiquement ce choix.

L'utilisation d'une condition périodique dans les méthodes dynamiques, pour calculer les charges de climatisation et/ou de chauffage, nécessite de donner une grande importance aux effets des conditions initiales. Malheureusement, au meilleur de nos connaissances, peu d'études ont détaillé la méthode par laquelle ils ont éliminé les erreurs dues aux conditions initiales. On pense même qu'il y a des études qui n'ont pas traité ce problème-là.

Le principal objectif de cette étude est de voir l'influence des conditions aux limites et initiale sur le temps de calcul et sur la précision des résultats d'optimisation de l'épaisseur d'isolation pour différentes orientations des murs des bâtiments. Pour cela, un code de calcul a été programmé pour calculer : les charges de climatisation, l'épaisseur optimale d'isolation et le délai de récupération (Payback) dans la région de Ouargla. En premier temps, les valeurs, heure par heure, de la température ambiante et du rayonnement solaire pendant six mois (cas réel) sont utilisées comme conditions aux limites. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par le cas des conditions périodiques, une fois par le choix du 15 Juillet et une deuxième fois par le choix du 21 Juillet comme jour représentatif (jour type) de toute la période étudiée. L'effet des conditions initiales est également étudié en prenant comme critère de stabilité ; la différence relative des charges de climatisation totales au lieu des différences relatives de températures déjà étudiées par Tugce Pekdogan et Tahsin Basaran [5].

Enfin, une méthode innovante pour calculer un jour typique dont la variation de la température ambiante et le rayonnement solaire sont calculés en se basant sur les données climatiques de toute la période étudiée et cela par l'utilisation de la transformation de Fourier rapide (Fast Fourier Transform FFT). L'efficacité de cette méthode, de point de vue précision et temps de calcul, est testée pour les quatre orientations des murs du bâtiment (Est, Ouest, Nord et Sud) et pour plusieurs régions (Ouargla, Bechar et Adrar).

Ce document est organisé en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre on a présenté la grande diversité du choix du jour typique, utilisé comme condition aux limites, dans les différents modèles numériques des problèmes

physiques. On a concentré notre recherche bibliographique sur l'optimisation de l'épaisseur d'isolation thermique des murs des bâtiments. Un résumé des études antérieures, qui ont traité les effets des conditions initiales sur la précision des résultats est aussi présenté dans ce chapitre.

- Le deuxième chapitre est consacré à présenter les différentes méthodes utilisées pour l'optimisation de l'isolation thermique des bâtiments. On a commencé par la présentation des méthodes les plus simples (degrés-jours et degrés-heures) vers la plus complexe (méthode dynamique). Plusieurs modèles économiques, nécessaires pour accomplir l'optimisation de l'épaisseur de l'isolation thermique, sont aussi présentés à la fin de ce chapitre.

- La méthode des différences finies, utilisée pour trouver une solution numérique de notre problème, est présentée dans le troisième chapitre. Le choix de la méthode de résolution du système d'équations linéaires entre la méthode Gauss, LU ou Gauss Seidel (itérative) ainsi que l'organigramme du code de calcul réalisé, sont également détaillés dans ce chapitre. La validation de notre code de calcul, par la comparaison de nos résultats avec d'autres obtenues par des codes professionnels tel que « Ansys Fluent », est détaillée à la fin de ce chapitre.

- Dans le dernier chapitre, la géométrie et les conditions aux limites du problème étudié sont présentées en détail. Les résultats obtenus par l'utilisation d'une condition à la limite extérieure réelle sont présentés en premier temps. Ces résultats sont utilisés par la suite, pour valoriser le choix entre le 15 et le 21 Juillet dans le cas où une condition périodique est utilisée. L'effet des conditions initiales sur la précision des résultats est aussi présenté dans ce chapitre. Enfin, une méthode innovante pour calculer un jour typique en se basant sur les données météorologiques de la période étudiée (six mois), ainsi que les résultats obtenus par cette méthode sont présentés à la fin de ce chapitre.

- Ce document est clôturé par une conclusion générale, contenant à sa fin, des recommandations qui peuvent ouvrir la porte à d'autres recherches scientifiques.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

I.1. Introduction :

L'utilisation de la simulation numérique pour résoudre des problèmes physiques, nécessite la connaissance des conditions aux limites. Dans beaucoup de problèmes on utilise les données météorologiques tel que : la température, le rayonnement solaire, l'humidité, la vitesse du vent ...etc. Souvent, les données météorologiques à introduire comme conditions aux limites sont des valeurs mesurées chaque heure durant une longue période (quelque mois, voire même parfois, une année). Un remplacement de toute la période étudiée, par un seul jour qu'on l'appelle « jour type » pour minimiser le temps de calcul d'ordinateur est nécessaire. Dans ce qui suit on va présenter, des études qui ont choisi d'utiliser les données météorologiques d'un jour typique, comme condition aux limites, pour accomplir leurs simulations numériques.

I.2. Choix du jour type :

La journée type, c'est-à-dire la journée météorologique type, est le jour choisi pour représenter les caractéristiques climatiques de l'année météorologique typique en tenant compte de la température, de l'humidité, du rayonnement solaire, etc.[6]

Le remplacement de la période réelle, caractérisée généralement par une longue durée, par un jour type, dans les simulations numériques, est utilisé souvent dans plusieurs études de différents domaines, dont on peut citer :

I.2.1. Collecteur photovoltaïque thermique (PV/T) :

Afin d'étudier le comportement thermique et électrique du collecteur PV/T dans les conditions climatiques de Monastir en Tunisie, un programme en FORTRAN 90 a été réalisé par Oussama Rejeb et al [7] pour étudier l'effet du rayonnement solaire, de la température de l'eau en entrée, du nombre de panneaux de vitrage et du coefficient de transfert de chaleur par conduction entre l'absorbeur et le module PV, sur les rendements thermique et électrique du PV/T. Les calculs numériques ont été effectués par la méthode des volumes finis **pour quatre jours typiques de l'année** à savoir le **3 janvier, le 20 avril, le 17 juillet et le 8 octobre**. Les auteurs ont utilisé la température ambiante et le rayonnement solaire horizontal, d'un jour type

pour chaque saison, comme conditions aux limites. Ils n'ont pas justifié leurs choix de ces journées types, comme ils n'ont pas mentionné dans leur article comment ils ont traité le problème de l'imprécision des résultats numériques causée généralement par les conditions initiales.

Mohamed Hissouf et al [8] ont examiné, par simulation numérique, l'effet de l'introduction des nanoparticules de cuivre (Cu) et d'alumine ($Al_2 O_3$) dans l'eau pure (fluide de refroidissement de la cellule photovoltaïque) sur les performances du système PV/T. Le modèle développé est appliqué, pour évaluer les puissances électriques et thermiques quotidiennes, générées par le système hybride au cours d'un jour **typique (28/05/2017)**, pour les conditions météorologiques de la ville d'Agadir (Maroc). Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de nanofluide Cu-eau peut fournir une meilleure amélioration des performances du système par rapport à $Al_2 O_3$ -eau.

I.2.2. Panneaux solaire CSP (Concentrated solar power) :

Esmail M.A. Mokheimer et al [9] ont étudié la faisabilité technique et économique de l'intégration des concentrateurs solaires (CSP) dans les systèmes de turbine à gaz à cogénération, progressivement installés en Arabie saoudite, pour produire de l'électricité. Les auteurs ont discuté deux approches pour l'insertion des conditions météorologiques comme conditions aux limites : la première, consiste à utiliser toutes les valeurs et cela pour chaque heure de l'éclairement solaire, de la température de l'air ambiant et de l'humidité durant deux mois de l'année, la deuxième approche est d'utiliser seulement **un jour type des valeurs moyennées, pour chaque mois de l'année**. Les auteurs ont utilisé dans leur simulation la deuxième approche. Ils ont justifié ce choix par la réduction importante du temps de calcul tout en conservant la précision des résultats. En plus ils ont soutenu leur choix par une recherche antérieure de Esmail M.A. Mokheimer et al [10] qui ont trouvé une différence relative de la production totale d'énergie par un collecteur cylindro-parabolique, des deux approches, de 0,195% calculée pour le mois de Janvier et 0,039% pour le mois de Juin.

N. Ben Hassine et al [11] ont présenté une modélisation d'un séchoir solaire des boues résiduelles. Les résultats sont obtenus par une étude numérique du séchage solaire des boues d'épuration en fonction des conditions climatiques de la région de Tataouine dans le sud de la Tunisie. La méthode des différences finies implicites est utilisée comme méthode de

discrétisation du modèle mathématique. Les auteurs ont conclu que l'efficacité du séchage varie sous l'effet des conditions climatiques et qu'elle est maximale en été, en plus le transfert thermique par la chaleur latente est prédominant. Les données météorologiques annuelles utilisées comme conditions aux limites sont simplifiées par le choix **d'une seule journée typique pour un seul mois de chaque saison**. Ils ont choisi le mois de janvier pour l'hiver, avril pour le printemps, juillet pour l'été et octobre pour l'automne.

I.2.3. Cheminée Solaire :

Yangyang Xu et Xinping Zhou [12] ont étudié les influences, de plusieurs procédures de stockages de chaleur, pour différentes intensités du rayonnement solaire, pour optimiser la puissance générée par les centrales solaires à cheminées (CSC). Ils ont trouvé que le stockage de chaleur par l'eau de 0,2 m d'épaisseur est meilleur que celui par les sols naturels pour différentes intensités de rayonnement solaire. Pour cela, ils ont résolu les équations qui régissent l'écoulement de l'air et le transfert de chaleur dans les (CSC) afin d'aboutir à des résultats, par simulation numérique, **d'une seule journée typique**. Les données météorologiques de Wuhan (en Chine) pour **un jour d'été typique**, dont les variations du rayonnement solaire et de la température ambiante, durant 24 heures, sont calculées en moyenne, pendant un mois typique d'été (juillet).

Pour définir l'emplacement adéquat des turbines, ainsi que l'influence du système de stockage par l'eau sur les performances et sur la durée de fonctionnement après le coucher de soleil d'une (CSC) située sur le site d'Adrar, une étude de l'écoulement turbulent de l'air, sous l'effet de la convection naturelle, dans une centrale solaire à cheminée (CSC) a été réalisée par M. SEMAI Hakim [13, 14]. Les conditions aux limites ont été définies selon les données météorologiques (Rayonnement solaire et température ambiante), disponibles sur le site d'Adrar, considérées pour **un jour type pour chaque mois de l'année**. Malheureusement, aucune information n'est fournie sur la méthode utilisée pour calculer le jour type. Les résultats ont montré que le (CSC) muni d'un collecteur convergent avec un dispositif de stockage composé du sol et d'un bac rempli d'eau, d'une épaisseur de 10 cm, garantis la continuité de fonctionnement du système durant toute la journée.

I.2.4. Cheminée solaire utilisée pour la ventilation naturelle des habitats :

Dans le but d'évaluer la faisabilité d'une cheminée solaire en tant que système de ventilation, pour aider à améliorer la conception bioclimatique des bâtiments passifs à Mérida, Mexico, un code de calcul numérique basé sur la méthode des volumes finis a été développé par I. Zavala-Guillén et al [15]. Les auteurs ont évalué le potentiel de ventilation de la cheminée solaire. Les données climatiques du rayonnement solaire et de la température ambiante **des jours les plus froids et les plus chauds de l'année 2014 ont été utilisées comme journées types (28 mai et 12 janvier 2014)**. Selon les résultats trouvés la cheminée solaire étudiée améliore considérablement la ventilation dans les chambres et répond aux exigences du confort thermique recommandées par l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

M.A. Hosien et S.M. Selim [16] ont étudié, par simulation numérique, les performances d'une cheminée solaire utilisée pour la ventilation naturelle d'une enceinte fermée afin d'économiser de l'énergie dans des conditions météorologiques du Caire-Egypte. Les résultats ont montré que le taux de renouvellement d'air par heure (air change rate per hour ACH) dépend considérablement de la vitesse du vent ainsi que des dimensions de la cheminée. Les calculs numériques sont effectués pour la période de trois mois les plus chauds habituellement en Caire (juin, juillet et août). Les données climatiques de rayonnement solaire, de vitesse du vent et de température ambiante **d'une seule journée typique pour chaque mois (10 juin, 20 juillet et 20 août)**, ont été introduites comme conditions aux limites. Les auteurs n'ont pas mentionné dans leur article les critères de choix de ces jours typiques.

I.3. Optimisation de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments :

Dans la plupart des bâtiments construits en Algérie, l'enveloppe est constituée d'un mur en double brique avec une séparation de 5 cm d'air. Cette méthode d'isolation n'est pas coûteuse, mais les recherches précédentes ont montré que cette méthode, génère une grande charge annuelle de climatisation et par conséquent, une grande consommation d'énergie [17, 18]. L'isolation thermique des bâtiments vise, non seulement à garantir un certain confort thermique, mais aussi à le garantir au moindre coût et donc avec la moindre consommation d'énergie. Pour les zones situées au sud de l'Algérie, comme la Wilaya de Ouargla (climat saharien chaud et

sec), une grande partie de l'énergie consommée par les bâtiments est utilisée pour la climatisation [19]. L'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment réduit considérablement, la consommation d'énergie utilisée pour assurer le confort thermique [20]. L'augmentation de l'épaisseur de l'isolation réduit la consommation d'énergie, mais augmente le coût de l'isolation, ce qui nécessite une optimisation.

Des méthodes simples, telles que degrés-jours [21-25] ou degrés-heures [26-28], ont été utilisées pour calculer les charges de climatisation et de chauffage, afin d'optimiser l'épaisseur d'isolation dans les murs de bâtiments. Cependant, plusieurs études précédentes ont montré que les résultats obtenus par ces méthodes, considérées comme simples et rapides, sont imprécis [17, 18, 29, 30]. Ils constatent que la méthode des degrés-jours sous-estime les charges de refroidissement et, par conséquent, sous-estime les valeurs de l'épaisseur optimale (L_{opt}), la période de récupération et surestime les économies d'énergie. L'imprécision des calculs d'épaisseur d'isolation optimale se traduit directement par des coûts supplémentaires. Cela entraîne une consommation d'énergie excessive, si l'épaisseur de l'isolant est sous-estimée, ou une dépense supplémentaire, si l'épaisseur de l'isolant est surestimée. La différence de quelques millimètres d'épaisseur d'isolation par mètre carré est multipliée par des milliers de mètres carrés pour une ville et par des millions pour un pays. Pour améliorer la précision des résultats et se rapprocher du cas réel, plusieurs études ont utilisé des modèles dynamiques pour calculer les charges de climatisation et/ou de chauffage en utilisant des conditions périodiques. Dans ce qui suit, on va présenter quelques études antérieures selon le choix de la journée typique.

I.3.1. Un jour typique pour toute la période étudiée :

Pour minimiser au maximum le temps de calcul, quelques chercheurs ont décidé d'approcher les 365 jours de l'année en deux jours typiques seulement : l'un pour l'été et l'autre pour l'hiver. La plupart de ces études ont choisi d'utiliser le 15 Juillet et le 15 Janvier ou le 21 Juillet et le 21 Janvier comme jours typiques des périodes estivale et hivernale respectivement. Parmi ces études on trouve :

L'étude de M Ozel et K Pihtili [31] qui ont choisi le 15 Juillet et le 15 Janvier, pour représenter les conditions typiques d'été et d'hiver de la ville d'Elazig en Turquie, afin de déterminer l'emplacement et la distribution optimale de l'isolation dans un mur d'épaisseur constant. Une analyse de 12 murs avec différentes configurations de couches d'isolation a été réalisée (voir figure I.1), en utilisant une méthode implicite de différence finie. Dans les calculs, des briques et des blocs de béton de 20 cm d'épaisseur en tant que matériaux de construction et un total de 6 cm d'épaisseur (6 cm, 3 + 3 cm et 2 + 2 + 2 cm) de laine de verre et de panneaux de liège comme matériaux d'isolation sont utilisés. L'emplacement des couches d'isolation est différent pour chaque configuration, tandis que l'épaisseur du mur et l'épaisseur totale de l'isolation, ont été maintenues constantes. Les résultats ont montré que les meilleures performances thermiques étaient obtenues dans le cas où l'épaisseur totale de l'isolant est divisée en trois couches de même épaisseur, dont la première était placée à la surface extérieure du mur, la deuxième était placée au milieu du mur et la troisième couche d'isolant était placée à la surface intérieure du mur.

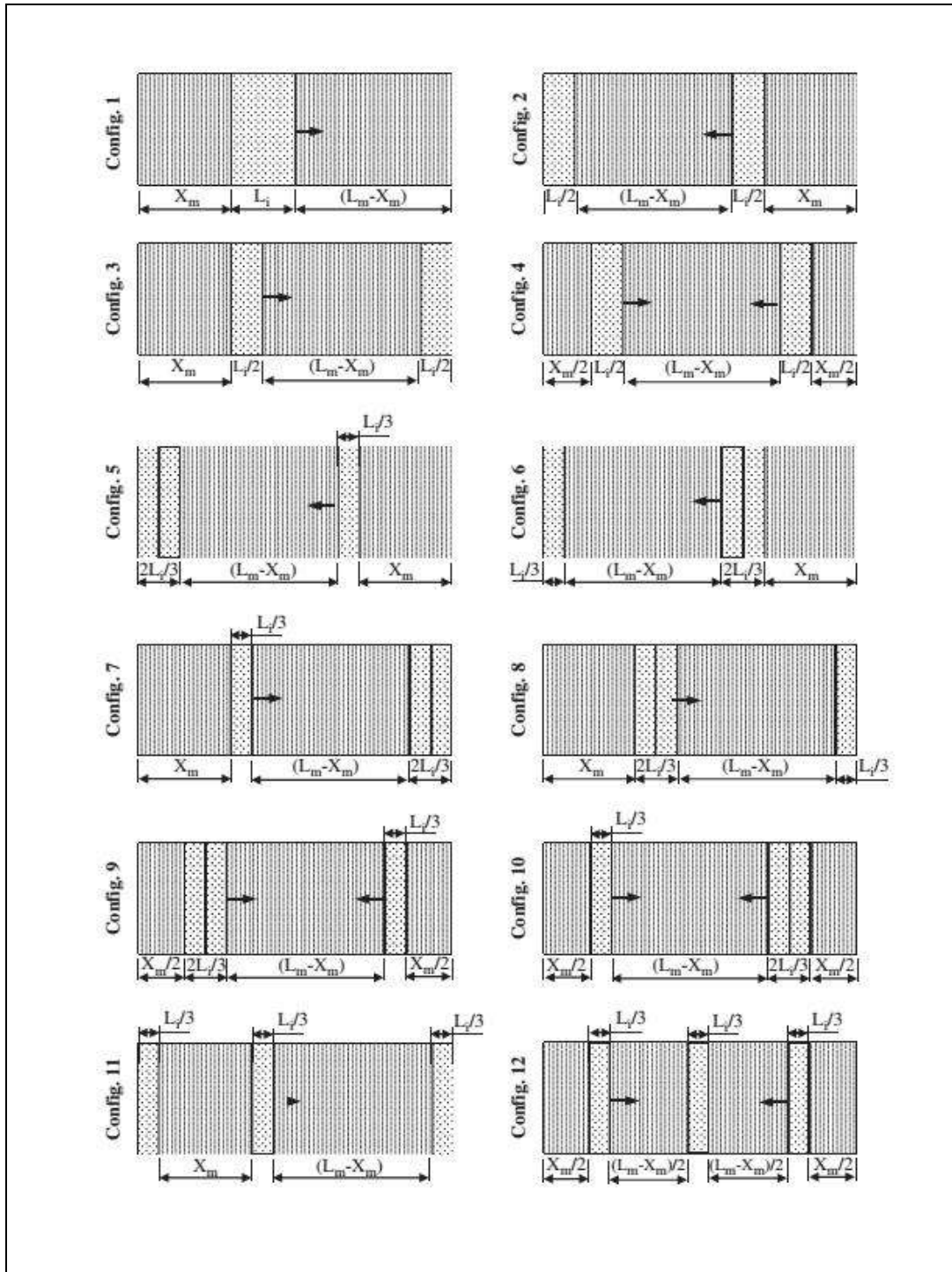


Figure I. 1 Différentes configurations du mur multicouche étudiées par M Ozel et K Pihili d'un mur en briques ou blocs de béton avec laine de verre ou liège comme isolant [31]

Dans l'étude de Naouel Daouas [17], l'auteur a choisi d'utilisé **le 21 Juillet et le 21 Janvier comme jours typiques**, pour calculer les charges annuelles de refroidissement (saison

d'été : de Juin à Septembre) et de chauffage (saison d'hiver : de Décembre à Février). La variation horaire du flux thermique traversant la surface intérieure du mur étudié, pour une épaisseur d'isolation donnée et une orientation de paroi donnée, est intégrée sur une période de 24 h pour obtenir une charge journalière totale. La procédure est répétée pour chaque jour de la saison de refroidissement (Juin à Septembre) et de la saison de chauffage (Décembre à Février) afin d'obtenir les charges annuelles de refroidissement et de chauffage par mètre carré de la surface du mur multicouches (voir figure I.2). Dans cette étude, l'épaisseur d'isolation optimale, les économies d'énergie et le délai de récupération (Payback) sont calculés pour une structure de mur typique en fonction des charges de refroidissement et de chauffage. Une analyse des coûts du cycle de vie sur une durée de vie de 30 ans a montré que l'orientation sud est la plus économique avec une épaisseur d'isolation optimum de 10,1 cm, des économies d'énergie de 71,33% et un délai de récupération de 3,29 ans. L'auteur a noté aussi que l'orientation du mur a un faible effet sur l'épaisseur optimale d'isolation, mais un effet plus significatif sur les économies d'énergie qui atteignent une valeur maximale de 23,78 dinar tunisien /m² dans le cas d'un mur orienté vers l'Est.

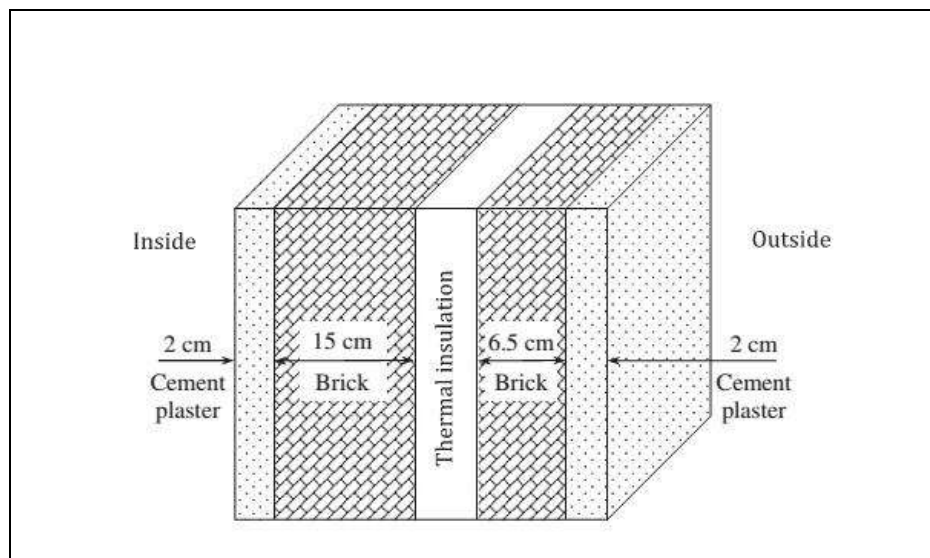


Figure I. 2 Mur multicouche étudié par Naouel Daouas [17]

Dans une autre étude [32], le même auteur a étudié l'isolation du toit en utilisant les mêmes jours typiques (**le 21 Juillet et le 21 Janvier**). Il s'intéresse à la détermination de l'épaisseur d'isolation optimale, des économies d'énergie et du délai de récupération (Payback), pour deux structures de toit typiques et deux types de matériaux d'isolation. Les résultats ont montré que

le toit le plus économique est celui construit en terre cuite creuse, isolé avec de la laine de roche. L'épaisseur d'isolation optimale, pour cette configuration, est estimée à 7,9 cm, avec une période de récupération de 6,06 ans et des économies d'énergie jusqu'à 58,06 %.

Le choix du **21 Juillet et le 21 Janvier comme jours typiques** pour l'optimisation de l'épaisseur de l'isolation thermique est aussi utilisée par Ramin, Hadi et al [33]. Dans cet article les auteurs ont déterminé numériquement l'épaisseur optimale d'isolation pour des murs construits en brique et en béton cellulaire et cela pour les conditions climatique de Téhéran, Iran (voir figure I.3). Le problème de transfert de chaleur transitoire unidimensionnel pour les murs multicouches a été résolu pour obtenir une distribution de la température à l'intérieur du mur. Différentes combinaisons de matériaux de murs et d'isolants ont été examinées. En plus, l'effet de la position de l'isolant (à l'intérieur ou à l'extérieur du mur) sur les charges de chauffage et de climatisation a également été étudié. Les résultats ont montré que les charges annuelles peuvent être diminuées de 70 % à 82 % par rapport à un mur non isolé en béton et de 31 % à 58 % pour un mur en briques et que l'emplacement de l'isolant ne modifie pas considérablement la charge annuelle.

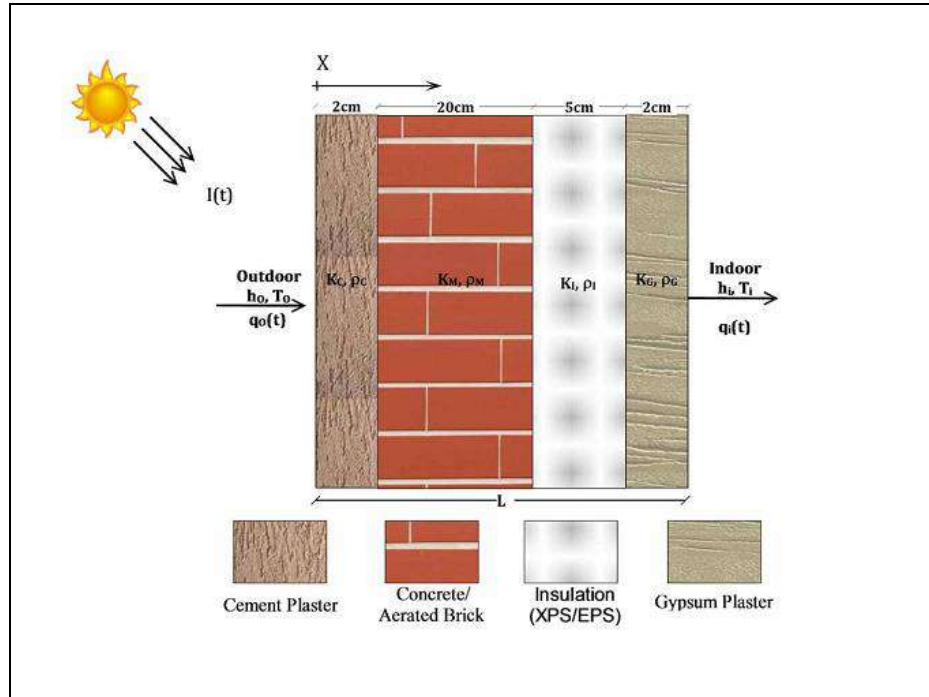


Figure I. 3 Mur multicouche étudié par Ramin, Hadi et al [33]

I.3.2. Un jour typique pour chaque mois de la période étudiée :

Beaucoup d'auteurs utilisent un jour typique pour chaque mois de la période étudiée. On trouve ceux qui prennent le 15^{ème}, et ceux qui prennent le 21^{ème} jour de chaque mois comme un jour typique. Mais on trouve aussi ceux qui calculent une journée moyenne en se basant sur les valeurs horaires des données climatiques de tous les jours d'un mois.

Meral Ozel utilise souvent le **15^{ème} jour de chaque mois** comme jour typique pour accomplir ses études [34-38]. Par exemple, elle a utilisé ce jour-là, pour étudier l'effet de l'orientation des murs sur l'épaisseur d'isolation optimale [39]. Elle a trouvé que les valeurs les plus faibles de l'épaisseur d'isolation optimale et de l'économie d'énergie, ont été obtenues pour le mur orienté vers le Sud, tandis que la période de récupération d'investissement reste presque la même pour toutes les orientations. Dans un autre travail elle a étudié les performances thermique et l'épaisseur d'isolation optimale de plusieurs types de murs multicouches avec différents matériaux de construction [40]. Dans cette étude elle a justifié son choix du 15^{ème} jour de chaque mois comme jour typique, par les grandes et les petites températures observées usuellement dans ce jour-là, mais elle a noté que le 21^{ème} jour de chaque mois est également choisi dans la littérature. Elle a effectivement utilisé cette journée typique (**21^{ème} jour de chaque mois**) pour calculer les charges de chauffage durant la période hivernale ; de Septembre à Mai, dans la région de Kars, en Turquie [41].

Pour déterminer l'épaisseur d'isolation optimale basée seulement sur les charges de refroidissement, des bâtiments qui se trouvent dans un climat chaud, Meral Ozel [29] a utilisé **le même jour typique (le 15^{ème} de chaque mois)**. Elle a étudié les mois les plus chauds : de Juin à Septembre. Elle a trouvé que pour la saison de refroidissement, la valeur la plus faible d'épaisseur d'isolation optimale est obtenue pour le mur orienté vers le Nord (charge de refroidissement minimale), tandis que l'épaisseur la plus élevée est obtenue pour les murs Est et Ouest (charge de refroidissement maximale). Les résultats ont montré aussi, que l'orientation la plus économique est l'orientation Nord, avec une épaisseur d'isolation optimale de 3,1 cm.

Al-Sanea et al [42] ont utilisé **le 21^{ème} jour de chaque mois de l'année comme un jour typique**, pour étudier l'effet du tarif de l'électricité sur le L_{opt} en Arabie saoudite. Les résultats ont montré que L_{opt} augmente avec le tarif de l'électricité et que le coût total varie linéairement avec L_{opt} pour les différents tarifs. Le même jour type est utilisé par le même auteur principal

pour étudier les valeurs de résistance thermique des murs simple et double couche, constitués de béton et d'argile, dans différentes régions climatiques de l'Arabie saoudite [30]. Il est à noter que l'auteur principal a utilisé aussi, une fonction sinusoïdale pour représenter la variation de la température ambiante extérieure et un rayonnement calculé, pour d'autres études [43-49]. Le même auteur, dans d'autres articles [50-54], confirme l'utilisation d'un jour typique pour chaque mois, sans donner des explications ou des informations sur ce choix.

En 2013, Sami A. Al-Sanea et al [55], ont publié une étude sur l'effet des matériaux de constructions et du coefficient d'absorption solaire sur l'inertie thermique des murs de bâtiments isolés. Dans cette étude, **un jour de chaque mois est considéré comme un jour typique**. Les moyennes des données climatiques de tous les jours d'un mois sont considérées comme un jour typique. De plus, les données horaires pour chaque jour représentatif d'un mois ont été moyennées sur un certain nombre d'années. Il indique que cette méthode, qui est maintenant assez courante dans l'analyse dynamique, réduit le temps de calcul à environ un trentième (1/30) sans affecter la qualité des résultats. Malheureusement, ils n'ont donné aucune référence pour confirmer cette très importante remarque.

I.4. Effet des conditions initiales sur la précision des résultats :

Le choix d'un seul jour typique pour toute la période étudiée ou pour chaque mois, réduit considérablement le temps de calcul d'ordinateur. Le calcul des charges de climatisation et / ou de chauffage au cours de cette journée typique doit être multiplié par le nombre total des jours de la période d'étude. Cela signifie qu'une petite erreur de calcul de ces charges au cours d'un jour, sera amplifiée et multipliée par le nombre des jours de la période étudiée, ce qui affecte directement la précision du calcul de l'épaisseur optimale de l'isolation. Alors, il faut accorder une grande importance aux choix de la journée représentative. En plus, les conditions périodiques engendrent automatiquement une instabilité numérique des résultats. La simulation numérique doit être répétée plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'un résultat stable, indépendamment des cycles répétés de simulation.

Tugce Pekdogan et Tahsin Basaran [5] font partie des rares auteurs qui ont brièvement expliqué la méthode dont laquelle ils ont traité l'effet des conditions initiales. Ils ont imposé une température T_{initiale} dans toute la zone maillée, comme condition initiale ($t=0$). Après l'exécution du code, une nouvelle distribution de température à travers la section de paroi est calculée. Elle représente la nouvelle distribution de température initiale pour l'itération suivante. Dans cette étude, les itérations ont été effectuées jusqu'à ce que la différence relative la plus élevée à travers tous les nœuds du mur, entre la valeur de température finale et précédente était de 0,5%. De leur côté, Sami A. Al-Sanea et al [30, 53] ont seulement mentionné dans leur article que la solution est répétée à un certain nombre de périodes, jusqu'à ce que les effets de l'instabilité des résultats disparaissent et qu'une solution périodique stable soit entièrement obtenue.

I.5. Conclusion :

D'après nos recherches bibliographiques, on n'a pas trouvé des méthodes approuvées scientifiquement pour choisir ou calculer un seul jour type, et cela pour remplacer la simulation d'une longue période. Plusieurs études ont préférés de prendre simplement les jours les plus froids ou les plus chauds, d'autre ont calculé la moyenne pour chaque mois ou pour toute la période étudiée. On trouve aussi des études qui ont utilisé une formule sinusoïdale pour calculer le jour typique utilisé dans leurs calculs. La grande diversité du choix du jour type, nous a conduits à poser une grande question sur le choix du jour typique le plus convenable et qui donne de bons résultats.

D'autre part, le choix de travailler avec une condition au limite périodique (jour type) nécessite de donner une grande importance aux effets des conditions initiales, dont on n'a pas trouvé dans les études antérieures, des explications suffisantes. Alors on a décidé d'étudier l'effet des conditions périodiques et des conditions initiales sur la précision des résultats numériques des problèmes de transfert thermique instationnaire. On a choisi le cas d'optimisation de l'épaisseur d'isolation thermique, vue sa grande influence sur l'économie de l'énergie. Ce choix est justifié aussi par la quantité très limité des études consacrées à cette application, en Algérie.

CHAPITRE II

OPTIMISATION DE

L'ISOLATION

THERMIQUE DES

BATIMENTS

CHAPITRE II : OPTIMISATION DE L'ISOLATION THERMIQUE DES BATIMENTS

II.1. Introduction :

Selon le Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville, 3 831 186 logements ont été lancés entre 2004 et 2012, dont 2 980 325 logements ont été livrés entre 2005 et 2011 dans 48 wilaya du territoire national [56]. L'absence d'un code de construction, qui oblige les entreprises de construction à isoler thermiquement les enveloppes des bâtiments est la raison majeure de la consommation excessive de l'énergie. Le 06 juillet 2019 à 15h00mn SONELGAZ a enregistré une demande d'une puissance électrique maximale de 14 343 MW (évolution de près de 5% par rapport à celle enregistrée pendant l'été 2018). Selon le ministère de l'Energie, « la forte croissance de la consommation de l'électricité par les foyers algériens, notamment pour les besoins de climatisation, explique cette hausse de la demande qui s'est exprimée de manière intense durant cette épisode de fortes chaleurs sur l'ensemble du territoire algérien » [19]. Jusqu'à présent, très peu d'études ont été réalisées en Algérie, sur l'optimisation de l'épaisseur d'isolation des murs des bâtiments, pour réduire la consommation de l'énergie électrique utilisée pour la climatisation ou de l'énergie du gaz naturel utilisée pour le chauffage.

II.2. Isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment

L'objectif de l'isolation thermique d'un bâtiment est de garantir un certain confort aux habitants, avec la moindre consommation d'énergie. Le coût total qui est égal à la somme du coût de l'installation de l'isolation et du coût de l'énergie, doit être minimal. En sachant que les deux coûts d'isolation et d'énergie sont inversement proportionnels, donc le coût total ne sera minimal que sur un point optimal.

En général, l'optimisation de l'épaisseur d'isolation des murs ou des toitures des bâtiments nécessite deux étapes principales. La première consiste à déterminer les charges annuelles de refroidissement ou/et chauffage, tandis que la deuxième consiste à effectuer une analyse économique des coûts. Chaque étape implique une multitude de paramètres, dans lesquels les chercheurs ont adopté diverses techniques, allant des plus simples (méthodes degrés-jours ou degrés-heures) jusqu'à les plus complexes (modèles thermiques dynamiques). Des modèles économiques sont aussi nécessaires pour accomplir l'étape de

l'optimisation. Le modèle le plus utilisé, est le modèle d'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV). La connaissance de la température de l'air ambiant et du rayonnement solaire global, est primordiale. Elles seront introduites comme conditions aux limites pour trouver la solution du système d'équations algébrique du modèle numérique.

II.3. Calcul des charges de climatisation ou de chauffage annuelles :

Le calcul des charges de climatisation en été ou de chauffage en hiver, peut être effectué en considérant que le transfert de chaleur par conduction est : en régime permanent (régime thermique stationnaire), ou en régime transitoire (modèle thermique dynamique) dont on peut citer :

II.3.1. Régime permanent :

Les méthodes de calcul des charges de climatisation et de chauffage si on suppose que le régime de transfert de chaleur est permanent, nécessitent moins de données et fournissent des résultats adéquats pour les systèmes et applications simples. Parmi ces méthodes, on trouve les méthodes des degrés-jours et des degrés-heures [57].

a) Méthode degrés-jours :

La méthode des degrés-jours (DJ) est introduite à la fin des années 1920 pour estimer les besoins, mensuels et annuels, de refroidissement et de chauffage des bâtiments [57]. Cette méthode est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour la quantification des charges de chauffage et de refroidissement d'un local. Elle est considérée comme un moyen simple qui sert à donner un coup d'œil sur la rigueur moyenne de l'hiver (besoin en chauffage d'un bâtiment) ou de l'été (besoin de refroidissement d'un bâtiment) pour chaque région.[58].

Beaucoup d'études ont défini le DJ comme étant la différence entre une température de base et la température quotidienne moyenne de l'air extérieur [59-66]. On peut définir deux valeurs différentes du DJ :

Le Degrés-Jours de chauffage DJC :

Définis comme un facteur qui indique les besoins en chauffage en [°C jours] :

$$DJC = \sum_{jours} (T_b - T_{ej})^+ \quad (II.1)$$

Où

T_b : représente la température de base très proche de la température de confort du local en hiver, elle est égale généralement à 18°C.

T_{ej} : est la température journalière moyenne de l'air extérieur.

Le signe plus au-dessus des parenthèses indique que seules les valeurs positives doivent être comptées.

Le Degrés-Jours de refroidissement DJR :

Définis comme un facteur qui indique les besoins en froid en [°C jours] :

$$DJR = \sum_{jours} (T_{ej} - T_b)^+ \quad (II.2)$$

T_b : représente la température de base très proche de la température de confort du local en Eté, elle est égale généralement à 23°C.

La somme du nombre de degrés-jours de chauffage ou de refroidissement sur une année est proportionnelle à la quantité d'énergie qui serait nécessaire pour chauffer ou refroidir un bâtiment à cet endroit.

b) Méthode degrés-heures :

On peut aussi calculer de manière plus fine les besoins de chauffage et de refroidissement d'un bâtiment par l'utilisation de la méthode **Degrés-Heures (DH)** [67-69]. On peut la définir par le résultat de la différence entre la température horaire moyenne de l'air extérieur et une température de base d'un bâtiment situé dans un lieu géographique donné.

Comme précédemment présenté pour le DJ, on peut définir pour le DH deux valeurs différentes :

Le Degrés-Heures de chauffage DHC :

Définis comme un facteur qui indique les besoins en chauffage en [°C heures] :

$$DHC = \sum_{heures} (T_b - T_{eh})^+ \quad (II.3)$$

Le Degrés- Heures de refroidissement DHR :

Définis comme un facteur qui indique les besoins en froid en [°C heures] :

$$DHR = \sum_{heures} (T_{eh} - T_b)^+ \quad (II.4)$$

Dans les deux formules (II.3 et II.4) T_{ch} représente la température horaire moyenne de l'air extérieur.

Pour les deux méthodes DJ et DH seule la température de l'air ambiant à l'extérieur est pris en considération. L'effet du rayonnement solaire sur l'augmentation des gains thermique d'un bâtiment est négligeable. Par conséquent la géométrie du bâtiment (orientation et couleur des murs, inclinaison des toitures, etc.) n'intervienne pas dans le calcul des charges de refroidissement ou de chauffage [70].

Pour introduire l'effet du rayonnement solaire dans le calcul plusieurs chercheurs ont utilisé une température appelée température Sol-Air ($T_{Sol-Air}$) à la place de la température journalière moyenne extérieur pour le DJ et à la place de la température horaire moyenne extérieur pour le DH [25, 26, 71-74].

II.3.2. Température Sol-Air :

La température Sol-Air est définie comme la température fictive de l'air extérieur qui, en l'absence de rayonnement solaire, donnerait la même distribution de température et le même taux de transfert de chaleur à travers un mur (ou une toiture), dont les conditions réelles combinés de température ambiante et du rayonnement solaire incident, sont imposées [75]. La température Sol-Air est définie par la relation suivante [76] :

$$T_{sol-Air}(t) = T_o(t) + \frac{\alpha I_r(t)}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad (II.5)$$

$T_o(t)$: Température de l'air extérieur en fonction du temps (K)

α : Coefficient d'absorption solaire

$I_r(t)$: Rayonnement solaire global en fonction du temps (W/m^2)

h_o : Coefficient d'échange thermique à la surface extérieur du mur multicouche (W/m^2K)

$\frac{\varepsilon \Delta R}{h_o}$: Facteur de correction ; allant de 0 °C pour les murs verticaux à 4 °C pour les murs

horizontaux [77]

II.3.3. Régime transitoire (modèle thermique dynamique) :

Malgré sa bonne précision, un petit nombre d'études ont appliqué le modèle de transfert de chaleur dynamique au lieu de la méthode degré-temps pour calculer le transfert de chaleur dans un mur multicouche [78, 79].

Pour calculer les charges de chauffage et/ou de refroidissement par ce modèle, la pluparts des études antérieures ont considéré que le transfert de chaleur s'effectue en une seule direction (problème unidimensionnel). Ils ont choisi d'utiliser la méthode des différences finis [5, 29, 33, 34], ou la méthode des volumes finis [30, 45, 52, 53] pour accomplir la discrétisation de l'équation de chaleur unidimensionnelle (équation II.6).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (\text{II.6})$$

Où

$a = \frac{k}{\rho C}$: Diffusivité thermique (m^2/s) avec,

k : Conductivité thermique ($\text{W}/\text{m K}$)

C : Chaleur spécifique ($\text{J}/\text{kg K}$)

ρ : Masse volumique (kg/m^3)

La solution numérique de l'équation (II.6) nous donne la distribution de la température à l'intérieur du mur multicouche en supposant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les sources de chaleur internes, dues aux équipements et aux occupants, sont négligées ;
- Les sources de chaleur externes, dues aux portes et fenêtres sont négligées ;
- Les caractéristiques physiques des différentes couches, constituant le mur, sont constantes ;
- La résistance thermique, due au contact des différentes couches du mur, est négligée ;

Les gains ou les déperditions thermiques sont alors calculer avec une grande précision et l'optimisation de l'épaisseur de l'isolation thermique sera plus réaliste.

Les étapes de la solution numérique de l'équation (II.6), par la méthode des différences finis, seront détaillées dans le chapitre III

II.4. Analyse économique

Pendant les périodes chaudes, le flux de chaleur entre dans les milieux intérieurs des habitats à travers les murs et augmente la température interne, ce qui va créer un mal à l'aise

chez l'être humain, l'inverse bien sûr est remarqué en hiver. Si on reprend le cas de la saison estivale ; la bonne sensation aux ambiances intérieures, est garantie par le dégagement ou le pompage d'une partie de la chaleur du milieu intérieur vers le milieu extérieur. Cela est faisable, par l'intermédiaire d'un climatiseur, appelé aussi pompe à chaleur (voir figure II.1). Cette opération va consommer, bien sûr, de l'énergie électrique. La quantité et par conséquent le coût de cette énergie, peut être minimisé par l'installation d'un isolant thermique. Chaque fois qu'on augmente l'épaisseur de l'isolant, les gains thermiques sont réduits et l'énergie consommée par la climatisation est diminuée, par contre le prix de l'installation de l'isolant est augmenté. Selon l'approche développée par A. Hasan [66], l'épaisseur optimale de l'isolation est choisie lorsque le coût total : définit comme étant : la somme des couts d'énergie et d'isolation, devient minimal sur la durée de vie du bâtiment.

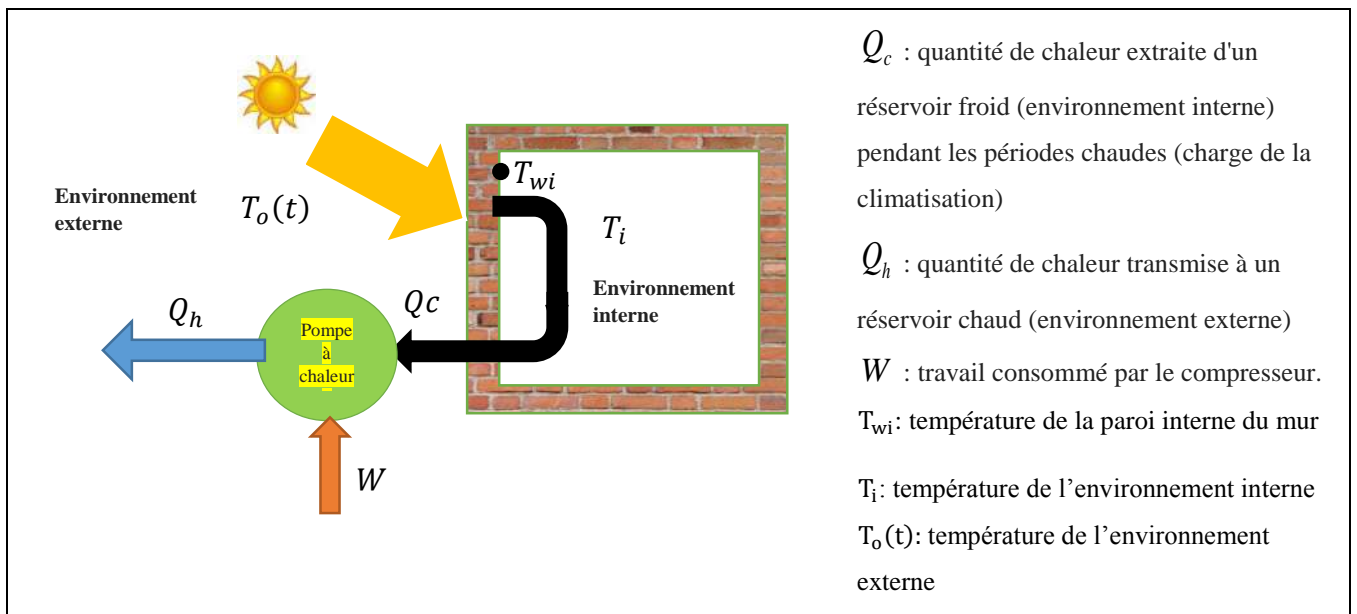


Figure II. 1 Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

La détermination de l'épaisseur optimale de l'isolation est représentée sur la figure II.2. On peut voir que le coût de l'isolation augmente linéairement avec l'épaisseur de l'isolant, tandis que le coût de refroidissement (ou de chauffage) diminue de façon exponentielle. Le coût total, diminue d'abord, atteint un minimum, puis augmente. L'épaisseur correspondant au coût total minimum sera l'épaisseur optimale d'isolation. C'est l'épaisseur d'isolation recommandée à installer [80].

Généralement, si deux épaisseurs optimales sont calculées ; l'une pour la saison hivernale (coût d'énergie consommée par le chauffage) et l'autre pour la saison estivale (coût

d'énergie consommée par la climatisation), l'épaisseur maximale sera finalement adoptée. Donc dans la plupart des cas l'étude se limite dès le début, par le choix de la période d'étude ; hivernal ou estivale, selon le climat dominant de la région étudiée (froide ou chaude durant toute l'année).

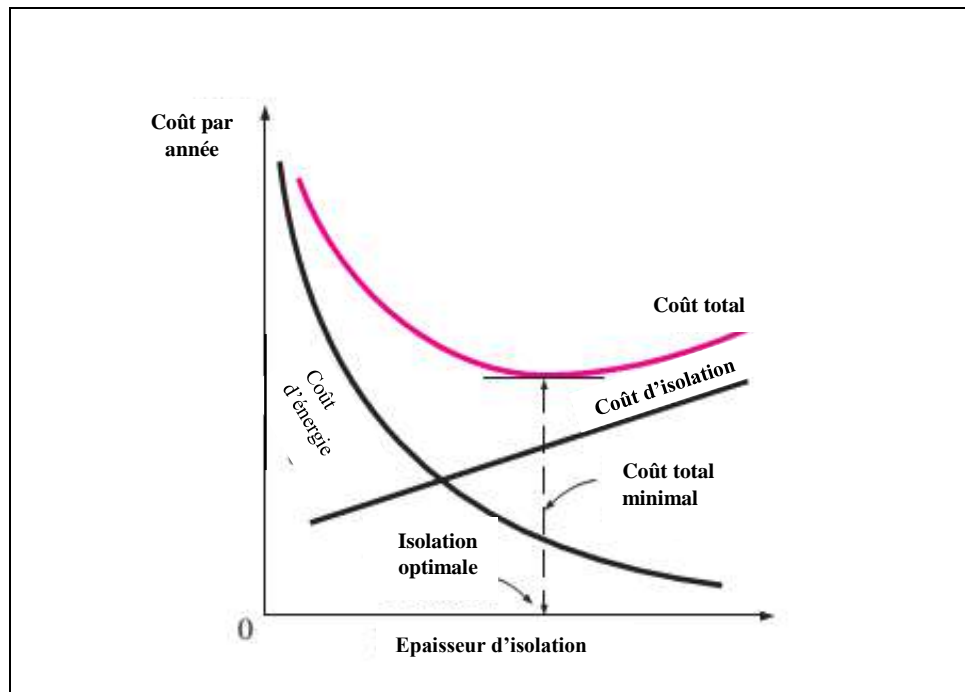


Figure II. 2 Détermination de l'épaisseur optimale de l'isolation sur la base de coût total minimum [80]

II.4.1. Analyse des Coûts du Cycle de Vie (ACCV) :

Deux méthodes économiques ont été utilisées pour optimiser l'épaisseur d'isolation thermique des murs extérieurs. La méthode la plus couramment utilisée est appelée Analyse des Coûts du Cycle de Vie (ACCV). Cette méthode a été utilisée dans de nombreuses études précédentes [81-85].

Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur en mode refroidissement, est donné par :

$$COP = \frac{Q_c}{W} \quad (II.7)$$

Où

Q_c : Quantité de chaleur extraite d'un réservoir froid (charges de climatisation)

W : Travail consommé par le compresseur de la pompe à chaleur.

La densité de flux de chaleur, transmis au milieu intérieur par la surface interne du mur multicouche est calculée comme suit : [17]

$$q_c = h_i \times (T_{wi} - T_i) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (\text{II.8})$$

h_i : Coefficient d'échange thermique à la surface interne du mur multicouche (W/m²K)

Pour une période donnée de t_i à t_f (généralement les mois qui nécessitent le refroidissement) la charge annuelle de refroidissement est donnée par :

$$Q_c = \sum_{t=t_i}^{t=t_f} q_c \times \Delta t \text{ (MJ/m}^2\text{)} \quad (\text{II.9})$$

t_i : Début de la période simulée

t_f : Fin de la période simulée

Δt : Incrément du temps (s)

De l'équation (II.7) l'énergie consommée par le climatiseur qui se caractérise par un coefficient de performance COP donné est :

$$W = \frac{Q_c}{COP} \quad (\text{II.10})$$

Le coût de l'énergie consommée par la climatisation durant une année par mètre carré est donné par :

$$C_c = \frac{Q_c \times C_e}{COP \times 3,6 \times 10^6} \quad (\text{II.11})$$

Où

C_c : Coût total de l'énergie consommée par la climatisation (\$/m²)

C_e : Coût de l'énergie électrique en \$/KWh

$$\text{Et} \quad 1 \text{ J} = \frac{1}{3,6 \times 10^6} \text{ KWh}$$

Le coût total est défini comme étant le coût de l'énergie totale consommée par la climatisation pendant la durée de vie du bâtiment, plus le coût de l'isolation. Sachant que le coût de l'énergie dépend des taux de l'inflation et d'intérêt, on peut donner la formule du coût total comme suit :

$$C_t = PWF \times C_c + C_i \times L_i \quad (\text{II.12})$$

Où PWF (Present Worth Factor) représente un facteur économique appelé **facteur de la valeur actuelle** et défini par l'équation (II.13) [17, 66, 86] :

$$PWF = \sum_{u=1}^n \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^u = \begin{cases} \frac{1+i}{d-i} \times \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^n \right] & i \neq d \\ \frac{n}{1+i} & i = d \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Dans l'équation (II.13), n représente la durée de la vie du bâtiment, supposée être de 30 ans, i et d représentent respectivement le taux d'intérêt et le taux d'inflation

Le coût d'énergie annuel cotisé après l'installation de l'isolant est défini par l'équation (II.14).

$$A_{ES} = \frac{(Q_{c-unins} - Q_c) \times C_e}{COP \times 3.6 \times 10^6} \quad (\text{II.14})$$

Où

$Q_{c-unins}$: Charges de climatisation pour mur sans isolation (MJ/m²)

Q_c : Charges de climatisation pour mur avec une épaisseur optimale d'isolation (MJ/m²)

Si les taux d'inflation et d'intérêt sont pris en compte, le coût total cotisé durant la durée de vie du bâtiment sera :

$$T_{ES} = A_{ES} \times PWF - C_i \times L_i \quad (\text{II.15})$$

C_i : Prix de l'isolant (\$/m³)

L_i : Épaisseur de l'isolation (mm)

Le nombre d'années nécessaires pour récupérer les coûts d'isolation, en tenant compte de l'influence des taux d'inflation et d'intérêt sur le coût de l'énergie, pendant la durée de vie du bâtiment est donnée par l'expression suivante [18, 25, 41]

$$PWF(P_b) = \frac{C_i \times L_{opt}}{T_{ES}} \quad (\text{II.16})$$

L_{opt} : Épaisseur optimale d'isolation (mm)

Donc

$$\begin{cases} P_b = \frac{\ln \left[1 - \left(\frac{d-i}{1+i} \right) \times \frac{C_i \times L_{opt}}{T_{ES}} \right]}{\ln \left(\frac{1+i}{1+d} \right)} & i \neq d \\ P_b = (1+i) \times \frac{C_i \times L_{opt}}{T_{ES}} & i = d \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

II.4.2. Méthode P1 –P2 :

Une autre analyse économique pour l'optimisation de l'épaisseur d'isolation, , plus complexe, est proposée par Duffie et Bechmanest [87]. Cette méthode, appelée méthode P1-P2, est aussi utilisée par plusieurs chercheurs [21, 67, 71, 88-90]. Elle a été formulée pour inclure une grande variété de dépenses (frais d'entretien, assurance du bâtiment et autres frais). **P1** représente le rapport des couts ; de l'énergie (électrique) durant le cycle de vie et le coût de l'énergie de la première année. Pendant que, **P2** représente le rapport entre les dépenses supplémentaires, au cours du cycle de vie du bâtiment, et l'investissement initial. Ce dernier est dû aux investissements supplémentaires par rapport à l'investissement initial. Si seul l'investissement initial est pris en compte et les frais d'entretien, d'assurance et d'autres frais sont négligés, P2 sera égal à 1.

$$P1 = \sum_{u=1}^n \frac{(1+i)^{u-1}}{(1+d)^u} = \begin{cases} \frac{1}{d-i} \times \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^n \right] & i \neq d \\ \frac{n}{1+i} & i = d \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$P2 = 1 + P1 \times M_s - \frac{R_v}{(1+d)^N} \quad (\text{II.19})$$

Où, M_s est le rapport des coûts d'entretien, d'assurance et d'autres frais, par rapport au premier coût, R_v est le rapport de la valeur de revente par rapport au premier coût.

Le coût total peut être calculé par l'équation :

$$C_t = P1 \times C_c + P2 \times C_i \times L_i \quad (\text{II.20})$$

II.5. Conclusion :

L'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments est l'une des méthodes utilisées pour réduire le coût d'énergie, afin d'assurer un certain confort thermique. En général, l'optimisation de l'épaisseur d'isolation dans les murs ou les toitures des bâtiments est calculée en deux étapes :

- a) Le calcul des charges annuelles de climatisation ou de chauffage (gains de chaleur en hiver ou déperdition en été) par des méthodes simplifiées tel que : degrés-jours ou degrés-heures (méthodes simples et peu précises) ou par des méthodes thermiques dynamiques (plus complexes mais plus proche de la réalité).
- b) Le calcul de l'épaisseur optimale d'isolation par l'utilisation d'un modèle économique très utilisé par les chercheurs (Analyse des Coûts du Cycle de Vie **ACCV**) ou d'un autre, très proche du premier mais plus complexe (modèle **P1-P2**).

Afin de commencer notre étude, on a choisi d'utiliser la méthode dynamique pour le calcul des charges de climatisation, et le modèle économique **ACCV** pour l'optimisation de l'épaisseur d'isolation.

CHAPITRE III

METHODES

NUMERIQUES ET

VALIDATION DU

PROGRAMME

CHAPITRE III : METHODES NUMERIQUES ET VALIDATION DU PROGRAMME

III.1.Introduction :

Le calcul des charges de chauffage ou de climatisation, précédemment discuté dans le chapitre II, peut être effectué par plusieurs méthodes. Le modèle thermique dynamique est utilisé dans ce travail, dont la discrétisation de l'équation de chaleur est réalisée par une méthode de différence finie implicite. Le modèle économique « Analyse des Coûts du Cycle de Vie ACCV » est ensuite utilisé, pour accomplir le calcul de l'épaisseur optimale de l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment.

III.2.Formulation mathématique

Le transfert de chaleur dominant à travers l'enveloppe du bâtiment peut être considéré comme unidimensionnel. En négligeant la résistance de contact d'interface, des différentes couches du mur et en supposant que les caractéristiques physiques des matériaux soient constantes, l'équation de la chaleur peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (\text{III.1})$$

La discrétisation de l'équation différentielle partielle (III.1) sur le domaine de calcul (voir figure III.1), est effectuée par la méthode des différences finies implicite. La dérivée première de l'équation de chaleur est simplifiée par l'approximation à l'ordre 1 à droite (décentrée aval). Tandis que, la dérivée seconde est remplacée par l'approximation centrées d'ordre 2 (voir équation III.2)[91]

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = a \frac{T_{i+1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i-1,j+1}}{\Delta x^2} \quad (\text{III.2})$$

Si on suppose que $\lambda = \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$ où Δx et Δt sont respectivement des pas d'espace et de temps

$$T_{i,j+1} - T_{i,j} = a\lambda(T_{i+1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i-1,j+1}) \quad (\text{III.3})$$

$$T_{i,j} = -a\lambda T_{i-1,j+1} + (1 + 2a\lambda)T_{i,j+1} - a\lambda T_{i+1,j+1} \quad (\text{III.4})$$

Dont « i » représente l'indice du maillage spatiale suivant « x » et « j » le maillage suivant le temps « t ».

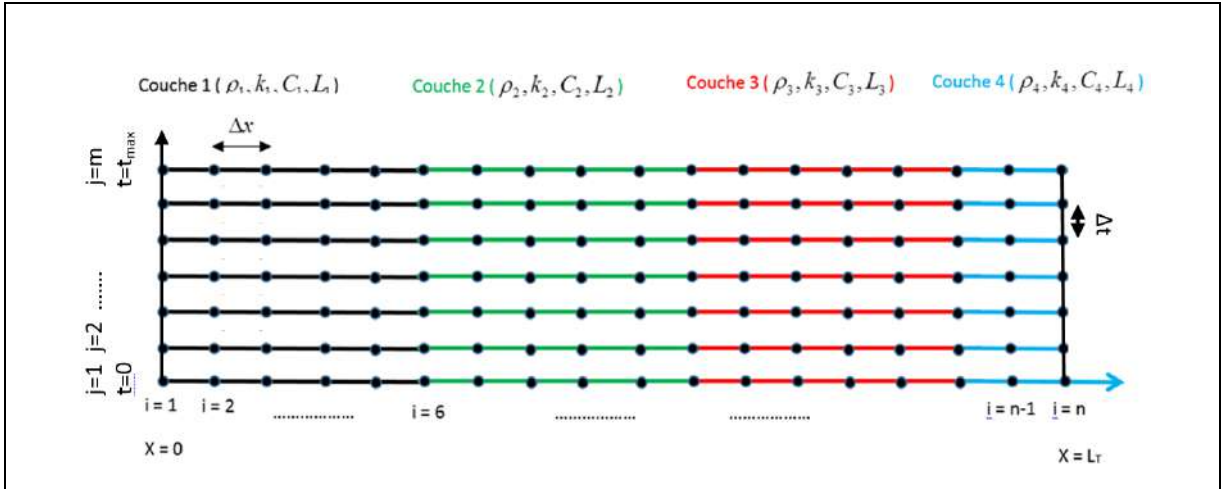


Figure III. 1 Maillage d'un mur multicouche unidimensionnel (nombre des couches l=4)

L'équation (III.4) est valable pour tous les nœuds internes du domaine de calcul (i = 2 jusqu'à i=n-1). Si, pour les limites droite et gauche du mur multicouche, on dispose d'un flux convectif à l'intérieur du local et un flux mixte à la limite extérieure (convection plus rayonnement), alors :

$$\text{À la limite extérieure : } q_o = h_o(T_e(t) - T_{wo}) \quad (\text{III.5})$$

$$\text{À la limite intérieure : } q_i = h_i(T_{wi} - T_{in}) \quad (\text{III.6})$$

T_{wi} et T_{wo} représentent la température des surfaces du mur, intérieur et extérieur respectivement, T_{in} la température de l'air ambiant à l'intérieur du bâtiment et $T_e(t)$ la température Sol-Air donnée par :

$$T_{Sol-Air}(t) = T_o(t) + \frac{\alpha I_T(t)}{h_o} \quad (\text{III.7})$$

Le coefficient d'absorption solaire α est égal à 0,8

- **Pour le nœud de la limite extérieur du mur : $i = 1$**

De l'équation (III.5) on peut écrire :

$$q_o = k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h_o (T_e(t) - T_{wo}) \quad (III.8)$$

En utilisant l'approximation d'ordre deux de la dérivée première, on trouve :

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = k_l \frac{T_{i+1,j+1} - T_{i-1,j+1}}{2\Delta x} = h_o (T_e(t) - T_{wo}) \quad (III.9)$$

Où k_l représente la conductivité thermique de la 1^{ème} couche du mur

Pour la limite gauche du mur multicouche (limite extérieure) on a $i=1$ et $l=1$ alors :

$$k_1 \frac{T_{2,j+1} - T_{0,j+1}}{2\Delta x} = h_o (T_e(t) - T_1) \quad \text{Où } T_{wo} = T_1 \quad (III.10)$$

Donc

$$T_{0,j+1} = \frac{2\Delta x h_o}{k_1} (T_e(t) - T_1) + T_{2,j+1} \quad (III.11)$$

Si on prend $i=1$ et on introduit l'équation (III.11) dans l'équation (III.4) on obtient :

$$\left(a\lambda \frac{2\Delta x h_o}{k_1} + 2a\lambda + 1 \right) T_{1,j+1} - 2a\lambda T_{2,j+1} = T_{1,j} + a\lambda \frac{2\Delta x h_o}{k_1} T_e(t) \quad (III.12)$$

- **Pour le nœud de la limite intérieur du mur : $i = n$**

De même façon pour la limite droite (limite intérieure), dont $i=n$ et $l=l_N$ où l_N représente la dernière couche dans le mur, on aboutit à l'équation suivante :

$$(-2a\lambda T_{n-1,j+1}) + \left(2a\lambda + 1 + a\lambda \frac{2\Delta x h_i}{k_N} \right) T_{n,j+1} = T_{n,j} + a\lambda \frac{2\Delta x h_i}{k_N} T_i \quad (III.13)$$

Dont $T_{n,j+1} = T_{wi}$

Dans cette étape, une seule inconnue est éliminée dans chaque équation. De cette façon, la dernière équation sera réduite à une équation et une inconnue. A la fin de cette élimination, le système d'équations à résoudre est donné par :

$$\begin{aligned}
 a_{11}T_1 + a_{12}T_2 + a_{13}T_3 + \dots + a_{1n}T_n &= b_1 \\
 a'_{22}T_2 + a'_{23}T_3 + \dots + a'_{2n}T_n &= b'_2 \\
 a''_{33}T_3 + \dots + a''_{3n}T_n &= b''_3 \\
 a^{(n-1)}_{nn}T_n &= b^{(n-1)}_n
 \end{aligned}
 \tag{III.16}$$

b) Remplacement et résolution :

Dans cette étape, la solution commence par la dernière équation, on trouve la dernière inconnue, ensuite on l'introduit dans l'avant dernière équation pour trouver le deuxième inconnu et ainsi de suite jusqu'à la résolution de tout le système. C'est ce qu'on appelle la substitution arrière ou méthode de la remontée.

Pour $i = n$

$$T_n = \frac{b_n^{(n-1)}}{a_{nn}^{(n-1)}}
 \tag{III.17}$$

Pour $i = n - 1, n - 2, \dots, 1$

$$T_i = \frac{b_i^{(i-1)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}^{(i-1)} x_j}{a_{ii}^{(i-1)}}
 \tag{III.18}$$

III.3.2. Décomposition LU

L'algorithme LU est une méthode de décomposition d'une matrice quelconque, en un produit de deux matrices dont la première est une matrice triangulaire inférieure L (Lower) et la deuxième est une matrice triangulaire supérieure U (Upper) comme illustré dans l'équation (III.19)

$$[A] = [L][U]
 \tag{III.19}$$

Où

$[L]$ = Matrice triangulaire inférieure (**L**ower triangular matrix)

$[U]$ = Matrice triangulaire supérieure (**U**pper triangular matrix)

Donc, si on veut résoudre le système d'équations suivant

$$[A][X] = [C] \quad (\text{III.20})$$

Il faut décomposer, en premier temps, la matrice $[A]$ en utilisant l'équation (III.19)

$$[L][U][X] = [C] \quad (\text{III.21})$$

La résolution du système d'équation de l'équation (III.20), nécessite des deux systèmes d'équations suivants :

$$[L][Z] = [C] \quad (\text{III.22})$$

Et

$$[U][X] = [Z] \quad (\text{III.23})$$

Alors, on peut trouver les inconnues de la matrice $[Z]$ par la résolution de l'équation (III.22) par substitution avant (L est une matrice triangulaire inférieure), ensuite utiliser l'équation (III.23) pour trouver les inconnues de la matrice $[X]$. par la substitution arrière (U est une matrice triangulaire supérieure).

III.3.3. Méthode de Gauss-Seidel (méthodes itératives) :

Pour certains problèmes, lorsque le système d'équations à résoudre est grand, les méthodes itératives de résolution sont plus avantageuses. Les méthodes de résolution directes, tels que l'élimination de Gauss, provoquent des erreurs d'arrondi plus importantes. Les méthodes itératives, telles que la méthode de **Gauss-Seidel**, donnent à l'utilisateur la possibilité de contrôler l'erreur d'arrondi. En outre, si le problème physique est bien connu, les conditions initiales peuvent être judicieusement choisies, pour aboutir à une convergence plus rapide.

Si les éléments diagonaux de la matrice $[A]$ sont non nuls, le système d'équations présenté par l'équation (III.15) peut être réécrit comme suit :

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{b_1 - a_{12}T_2 - a_{13}T_3 \dots - a_{1n}T_n}{a_{11}} \\
 T_2 &= \frac{b_2 - a_{21}T_1 - a_{23}T_3 \dots - a_{2n}T_n}{a_{22}} \\
 &\vdots \\
 T_{n-1} &= \frac{b_{n-1} - a_{n-1,1}T_1 - a_{n-1,2}T_2 \dots - a_{n-1,n-2}T_{n-2} - a_{n-1,n}T_n}{a_{n-1,n-1}} \\
 T_n &= \frac{b_n - a_{n1}T_1 - a_{n2}T_2 - \dots - a_{n,n-1}T_{n-1}}{a_{nn}}
 \end{aligned}
 \tag{III.24}$$

Sous forme de sommation on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{b_1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n a_{1j}T_j}{a_{11}} \\
 T_2 &= \frac{b_2 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^n a_{2j}T_j}{a_{22}} \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 T_{n-1} &= \frac{b_{n-1} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n-1}}^n a_{n-1,j}T_j}{a_{n-1,n-1}} \\
 T_n &= \frac{b_n - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^n a_{nj}T_j}{a_{nn}}
 \end{aligned}$$

Pour n'importe quelle ligne i :

$$T_i = \frac{b_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n a_{ij}T_j}{a_{ii}}, i = 1, 2, \dots, n.
 \tag{III.25}$$

Pour trouver T_i , on suppose une estimation initiale pour toutes les inconnues T_j puis on utilise le système d'équations (III.25) pour calculer les nouvelles estimations. Il faut toujours, utiliser les estimations les plus récentes pour calculer les estimations suivantes.

A la fin de chaque itération, on calcule l'erreur relative absolue tels que :

$$|\epsilon_a|_i = \left| \frac{T_i^{\text{new}} - T_i^{\text{old}}}{T_i^{\text{new}}} \right| \times 100 \quad (\text{III.26})$$

dont T_i^{new} est la valeur la plus récente de T_i , et T_i^{old} est la valeur précédente de T_i .

Lorsque l'erreur relative absolue pour chaque inconnue T_i est inférieure à la tolérance prédéfinies, les itérations sont arrêtées.

III.4.Choix de la méthode de résolution du système d'équation linéaire :

Avant de commencer l'étude de notre problème, on a essayé de choisir entre les trois méthodes de résolution numérique (LU, Gauss et itérative), précédemment présentées. Les critères du choix entre ces trois méthodes sont la précision, et le temps de calcul.

Pour comparer la précision des résultats obtenue par les trois différentes méthodes, une simulation numérique est exécutée, pour calculer le transfert de chaleur unidimensionnel par conduction instationnaire, dans un mur multicouche sans isolation thermique. Les conditions climatiques de température de l'air ambiant et du rayonnement solaire d'un jour type (15 Juillet), sont utilisées comme condition de l'interface externe du mur. Une température équivalente $T_{\text{Sol-Air}}$ est calculée, pour un mur vertical orienté vers l'Est. La figure III.2 représente la variation de la température de la surface interne (source principale des gains thermique) durant les 24 heures du jour typique, dont les dimensions des différentes couches du mur, les caractéristiques physiques et les conditions aux limites sont présentés dans le chapitre quatre.

On remarque clairement que les méthodes directes : de Gauss et de LU, ont abouties à des résultats très précise. Elles ont le même profil de la température de la paroi interne du mur, trouvée par la méthode itérative Gauss-Seidel, pour un critère de convergence de 10^{-6} . Les gains thermiques, durant six mois, calculés par la méthode de Gauss ou par la méthode LU, sont plus importants, d'un taux de 0,39%, par rapport à ceux calculés par la méthode itérative, d'un critère de convergence de 10^{-5} . Par contre, on voit que le choix du critère de convergence a de grand effets sur les résultats. On remarque une différence relative, entre les deux critères : 10^{-5} et 10^{-4} de 3,07%, et entre : 10^{-5} et 10^{-2} une différence de 97,88%.

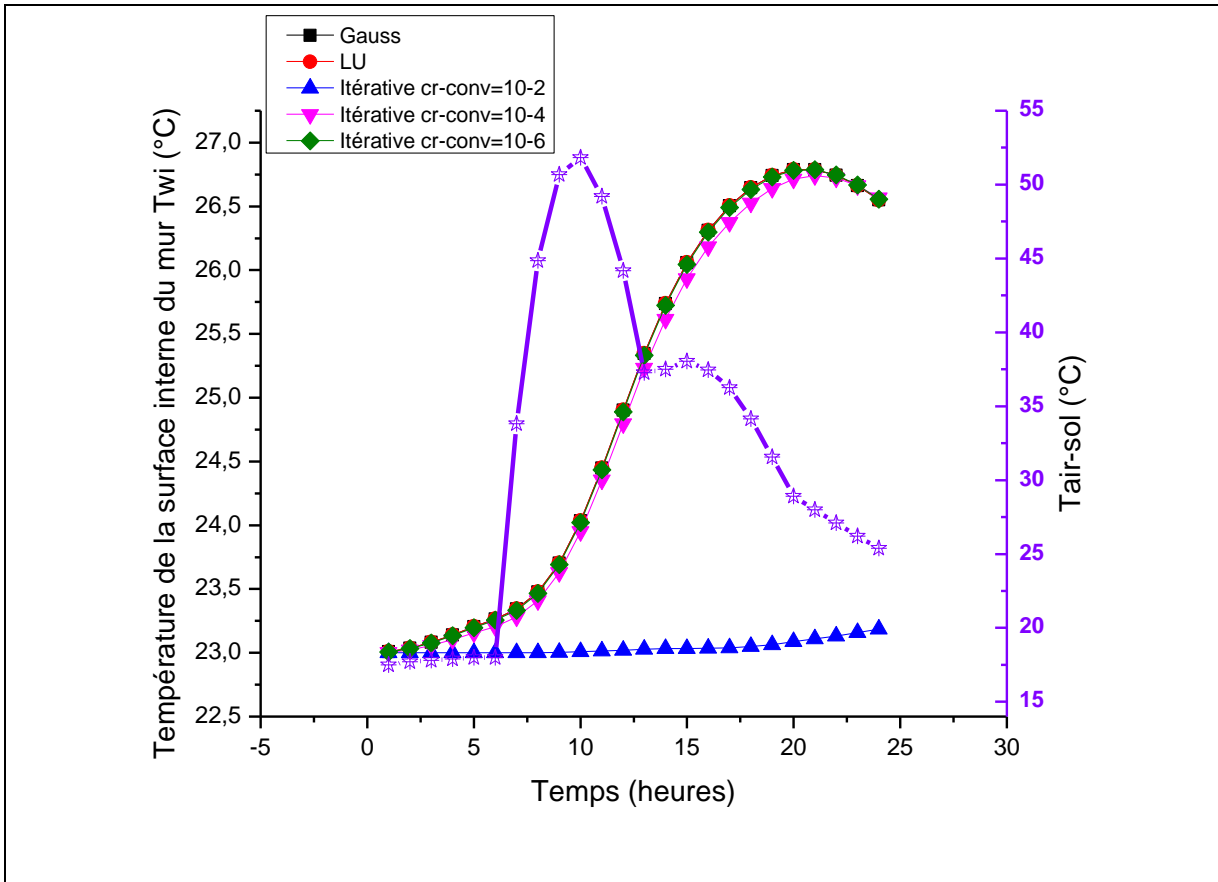


Figure III. 2 Comparaison entre différentes méthodes de résolution : Gauss, LU et Gauss-Seidel

Pour comparer entre le temps de calcul des trois méthodes, une optimisation de l'épaisseur d'isolation est lancée. On commence avec un mur sans isolation jusqu'à un mur avec 10 cm d'isolation. Un pas d'épaisseur d'isolant de 1cm est utilisé. On a commencé le calcul, avec 240 nœuds, pour un mur sans isolation, et on a arrivé à 340 nœuds, pour un mur de 10 cm d'isolant. Le transfert de chaleur à travers le mur est considéré toujours comme unidimensionnel. Le nombre des nœuds moyens pour chaque pas d'épaisseur d'isolant est égal à :

Nombre des nœuds suivant $x \times \text{nombre des heures (jour type)} \times 10$ (nombre des pas de l'épaisseur d'isolation)

Alors :

Mur sans isolation : $240 \times 24 \times 11 = 63360$ nœuds

Mur avec 10cm d'isolant : $340 \times 24 \times 11 = 89760$ nœuds

Soit d'une moyenne de :

$$\text{Moyenne : } \frac{240+340}{2} \times 24 \times 11 = 76560 \text{ nœuds}$$

Le temps de calcul d'ordinateur, pour chaque méthode, est présenté dans le tableau (III.1). Le temps de calcul minimal est observé pour la méthode de Gauss puis pour la méthode LU. Cette dernière, représente une augmentation de 44,37%, de temps de calcul d'ordinateur, par rapport à la méthode de Gauss. Les méthodes itératives nécessitent beaucoup de temps de calcul ordinateur pour achever le calcul. On remarque une augmentation de 960,4% pour un critère de convergence de 10^{-4} % et de 2085,93% pour un critère de convergence de 10^{-6} % par rapport à la méthode de Gauss.

En combinant les deux critères de choix ; précision et temps de calcul, on à constater, d'après nos résultats, que la méthode la plus convenable pour traiter notre problème, est **la méthode de Gauss**.

Tableau III. 1: Temps de calcul d'ordinateur pour les trois méthodes de résolution (LU, Gauss et itérative):

		Temps de calcul en s	Temps de calcul pour un jour typique (24h) en h/min/s	Temps relative en %
Gauss		182,428	3 min et 2.4s	0
LU		263,376	4min 23.3 s	44,372
Iterative	$ \epsilon _{\max} = 10^{-2}$	215,671	3 min et 35.67s	18,223
	$ \epsilon _{\max} = 10^{-4}$	1934,47	32 min et 14.47s	960,402
	$ \epsilon _{\max} = 10^{-6}$	3987,76	1h 6 min et 27.76s	2085,936

III.5. Organigramme du programme :

Un code de calcul en FORTRAN a été développé pour calculer, sous des données Météorologiques Réelles (DMR) ou périodiques (jour type), les charges de refroidissement annuelles ainsi que l'épaisseur d'isolation optimale. L'organigramme de ce code est présenté dans la figure III.3. Pour chaque orientation : Est, Ouest, Nord et Sud, on introduit en premier temps les données nécessaires pour le calcul, tel que : les caractéristiques géométriques et physique des différentes couches constituant le mur, le COP du climatiseur, le prix de l'énergie électrique, la durée de vie du bâtiment, les taux d'inflation et d'intérêt, les conditions aux limites et initiales...etc. Le calcul commence par un mur sans isolation thermique $L_{iso} = 0$ mm puis un mur avec un isolant, d'une épaisseur qui augmente d'un pas de 1mm, jusqu'à une couche d'isolation d'une épaisseur maximale de $L_{iso-max}=150$ mm. La période de calcul est de 24 heures pour une condition périodique (jour typique) et de 4416 heures pour des données Météorologiques Réelles (DMR).

Le calcul de la température à travers le mur, est effectué par l'une des méthodes numérique décrit précédemment dans ce chapitre (méthode LU, Pivot de Gauss ou itérative), alors que la densité du flux, pour chaque heure, est calculée par l'équation II.8. Pour garder la température constante dans le milieu intérieur, la chaleur reçue par le mur, d'une orientation donnée, doit être dégagée par une pompe à chaleur (climatiseur). Cette quantité de chaleur et appelée charge de refroidissement annuelle, elle est calculée par l'équation (II.9). Le coût annuel de l'énergie consommée par le climatiseur (équation II.11), le cout total (équation II.12), le coût d'énergies cotisées (équation II.14) et le coût total cotisé (équation II.15) sont calculés pour chaque pas d'épaisseur de l'isolant. Le coût total minimal coïncide avec l'épaisseur optimale de l'isolation.

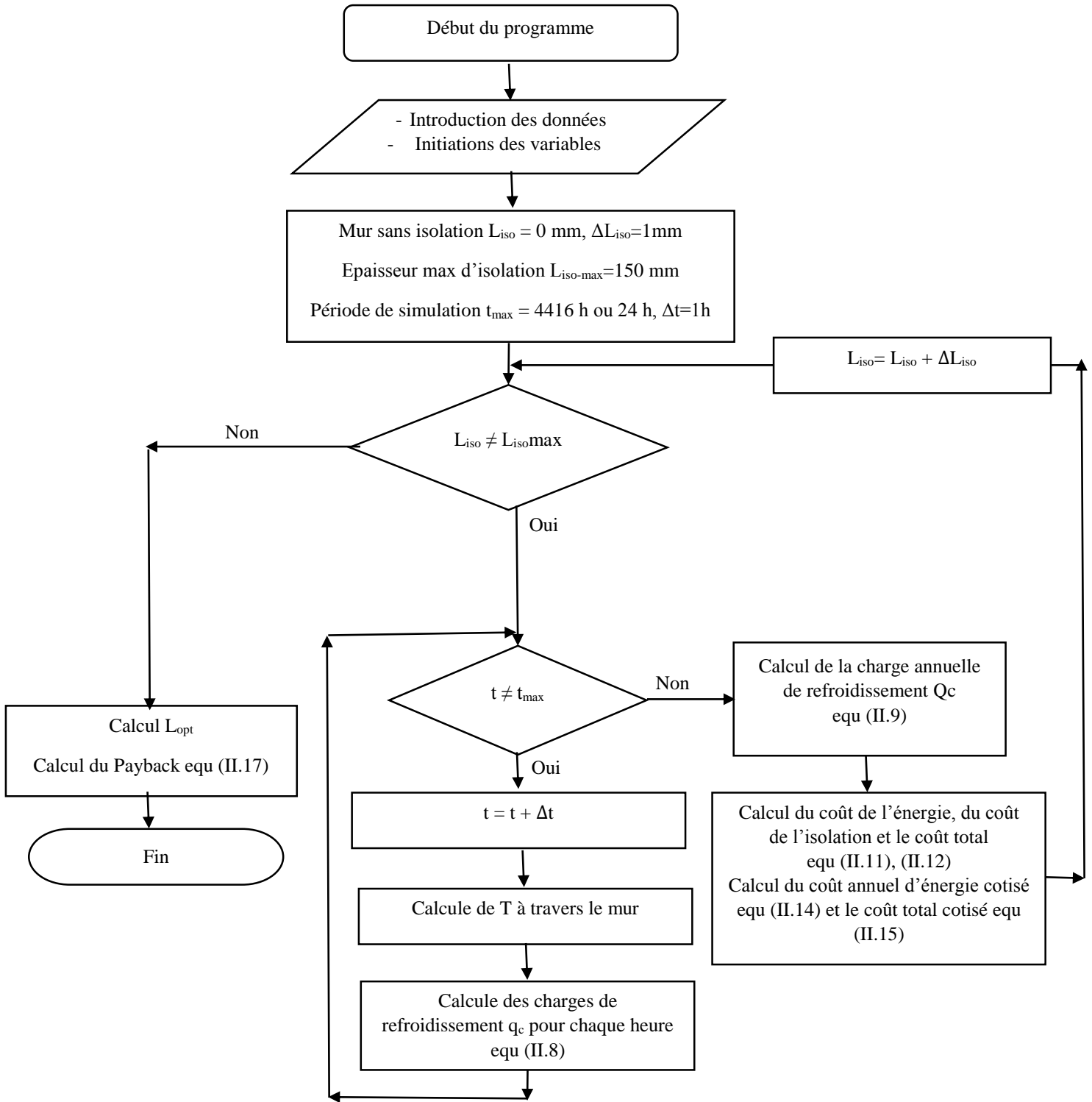


Figure III. 3 Organigramme du programme développé

III.6. Validation du code de calcul :

Deux codes commerciaux ont été choisis afin de valider notre code de calcul, écrit en FROTRAN. Le premier code ; « CodyMur » [93-95] dont la solution est obtenue par l'utilisation de la méthode des éléments finis, tandis que le second est le code « Ansys Fluent » qui utilise la méthode des volumes finis pour discrétiser les différentes équations différentielles de transport.

Une simulation numérique du transfert de chaleur à travers un mur multicouche unidimensionnel (béton lourd, laine de verre et plâtre) est réalisée en supposant comme condition à la limite extérieure, une température sinusoïdale qui varie entre 25 et 45 ° C. La température à la limite intérieure est supposée fixe, elle est égale à 26°C (voir figure III.4). La variation de la température à la limite externe en fonction du temps est générée par le code de calcul CodyMur. La même condition est introduite dans Fluent par l'utilisation de la fonction UDF (User Define Function). Pour négliger les effets des conditions initiales, nous avons choisi de simuler sept jours et cela avec un incrément de temps égal à une heure. Les caractéristiques thermophysiques des différentes couches du mur sont présentées dans le tableau III.2.

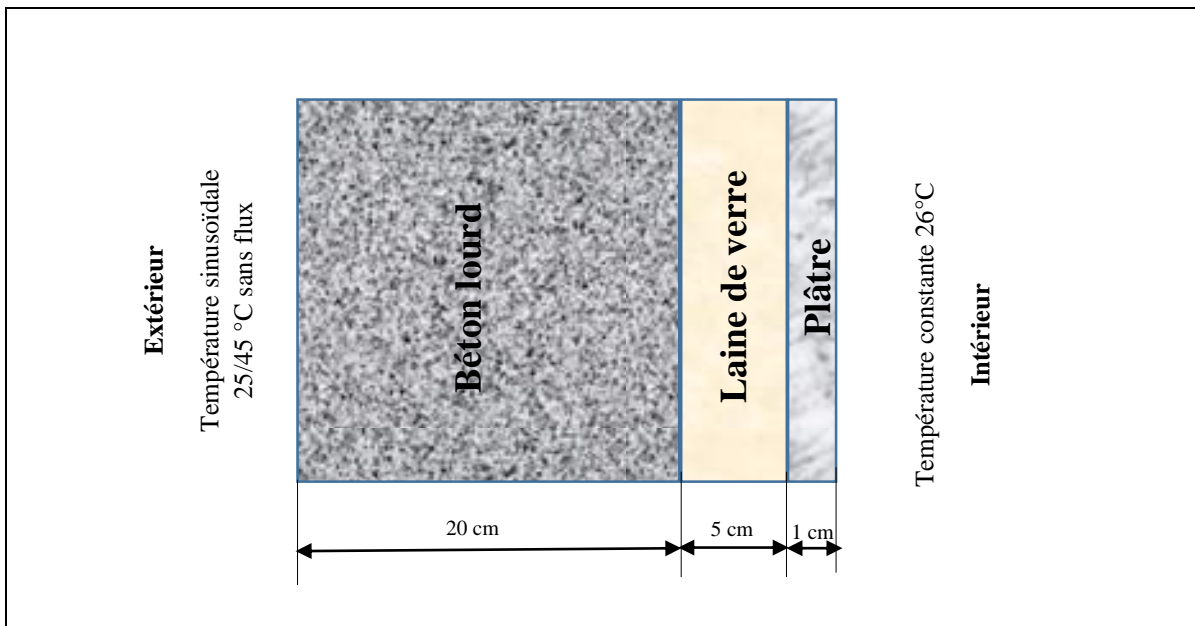


Figure III. 4 Géométrie et conditions aux limites du problème utilisé pour la validation du code de calcul

Tableau III. 2: Caractéristiques thermophysiques du mur multicouche [95]

Matériaux	k (W/m K)	C (J/kg K)	ρ (kg/m ³)
Béton lourd	2	1000	2450
Laine de verre	0,041	1030	15
Plâtre	0,43	1000	1050

Les résultats présentés dans la figure III.5 montrent un compromis entre les résultats obtenus par le code en FORTRAN et Fluent avec une erreur de biais moyenne (MBE Mean Bias Error) égale à 0,49% et une erreur quadratique moyenne (RMSE Root Mean Square Error) égale à 0,099%. Les résultats obtenus par le code en FORTRAN sont aussi très proches de celles obtenus par CodyMur, avec un MBE égal à 0,15% et un RMSE égal à 0,0089%. Les deux nombres MBE et RMSE sont calculés par les équations (III.27) et (III.28) [96].

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{168} (Ty_i - Tx_i)^2}{\sum_{i=1}^{168} Tx_i} \times 100 \quad (III.27)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^{168} (Ty_i - Tx_i)^2}{168} \right]}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^{168} Tx_i}{168} \right)} \times 100 \quad (III.28)$$

Où Ty_i est la température de surface du mur intérieur obtenue à partir du code FORTRAN et Tx_i représente la même température obtenue par Fluent ou CodyMur.

Le nombre 168 représente la somme des heures de sept jours.

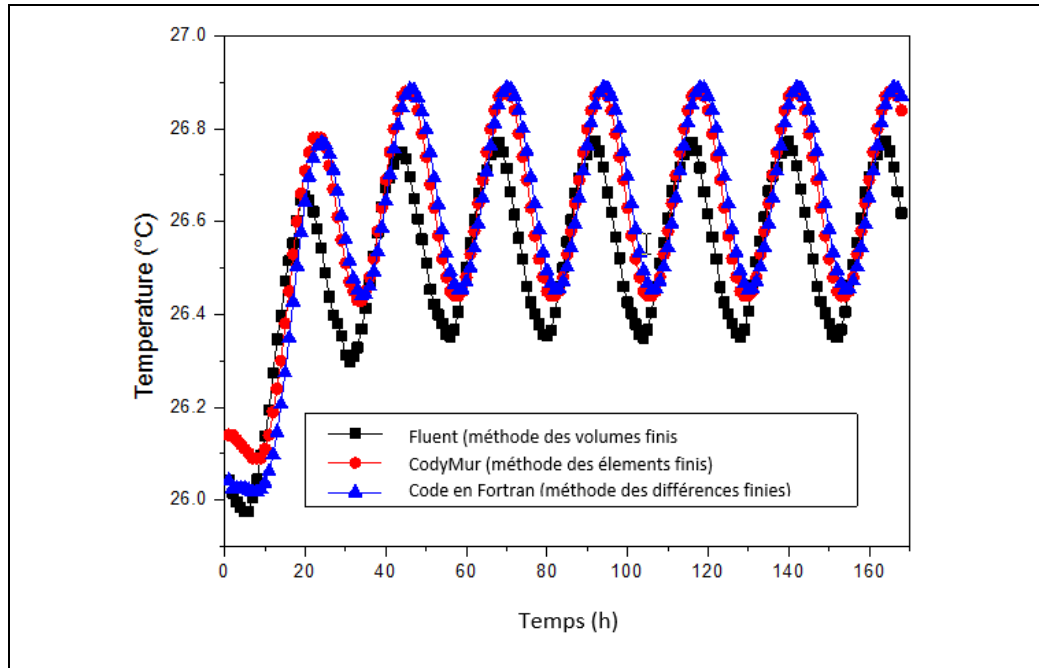


Figure III. 5 Validation du code de calcul

III.7. Conclusion :

Après la présentation de la méthode des différences finies, dans ce chapitre, plusieurs méthodes de résolutions numériques ont été testées (Gauss, LU et itérative). On a trouvé que la méthode la plus convenable pour résoudre notre problème, est la méthode de Gauss. De bons résultats, avec le plus court temps de calcul, ont été acquis par cette méthode. Notre code de calcul est, ensuite, validé par la comparaison de ses résultats, avec deux codes commerciaux. L'un des deux codes utilise la méthode des volumes finis et l'autre utilise la méthode des éléments finis, pour la discrétisation des équations de transport. La validation a donné des taux d'erreurs très faibles.

Enfin, on peut dire que notre code de calcul développé est prêt à traiter et à résoudre notre problème.

CHAPITRE IV
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Introduction :

L'optimisation de l'épaisseur d'isolation pour les différentes orientations (Est, Ouest, Sud et Nord) en fonction des charges de climatisation pour les conditions climatiques de Ouargla (région chaude et aride) est présentée dans ce chapitre. Dans un premier temps, les conditions météorologiques réelles de la région de Ouargla sont utilisées dans la simulation pour aboutir à des résultats précis qui s'approchent du cas réel. Pour réduire le temps de calcul, d'autres simulations sont effectuées pour un seul jour type (condition périodique) pour remplacer toute la période étudiée de 4416 heures par 24 heures seulement. Après une recherche bibliographique, on a trouvé que les auteurs basculent entre le choix du 21 ou du 15 Juillet sans donner des justifications, ce qui nous a amené à étudier les deux cas (21 et 15 Juillet) puis de comparer les résultats avec le cas réel (DMR). L'effet des conditions initiales sur la précision des résultats pour le cas des conditions stationnaires périodiques est aussi étudié. Enfin, une méthode innovante est proposée pour calculer la variation de la température Sol-Air d'un jour type, en se basant sur les données climatiques de toute la période étudiée, par l'utilisation de la transformation rapide de Fourier (FFT). L'objectif de cette proposition est de maintenir une grande précision des résultats et de garder un temps de calcul très réduit.

IV.2. Géométrie et conditions aux limites :

La figure IV.1 montre un mur composé de quatre couches réparties, de la face interne vers la face externe, comme suit : **2 cm** d'enduit de ciment, L_i cm de polystyrène extrudé, 20 cm de briques et **2 cm** d'enduit de ciment. L'épaisseur de l'isolant L_i varie de 0 à 15 cm. Les caractéristiques physiques des quatre matériaux de construction sont présentées dans le tableau IV.1.

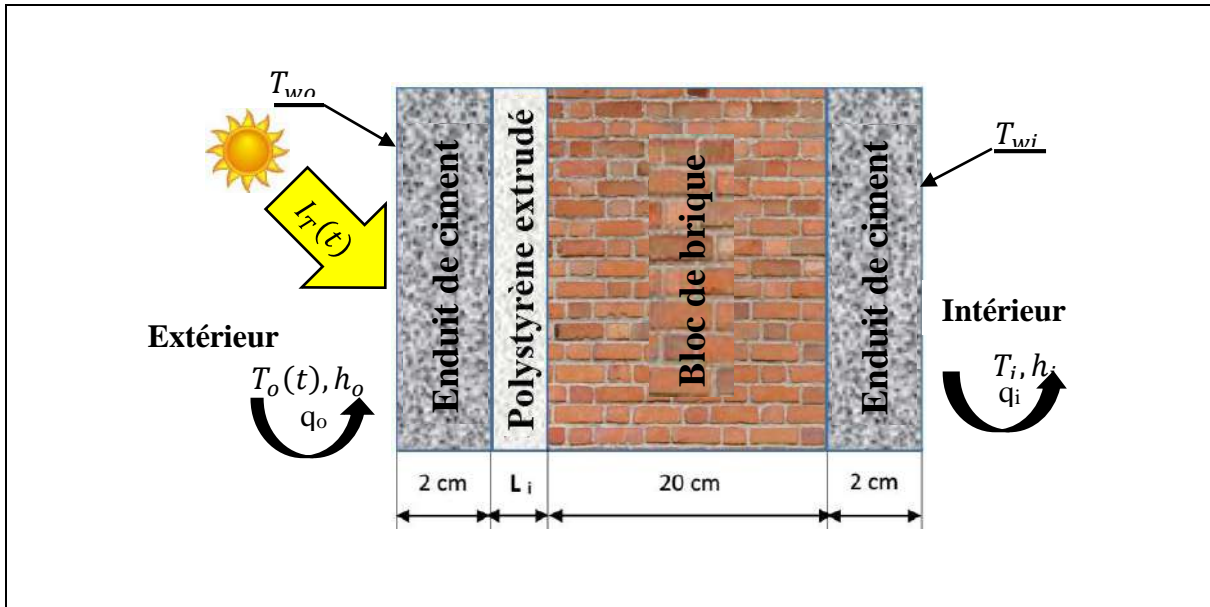


Figure IV. 1 Géométrie et condition aux limites du mur multicouche

Tableau IV. 1: Caractéristiques thermophysiques des matériaux de construction [34, 41]

Matériaux	k (W/m K)	C (J/kg K)	ρ (kg/m ³)
Enduit de ciment	0.72	840	1865
Polystyrène extrudé	0.029	1213	35
Bloc de brique	0.620	840	1800

Comme condition initiale, la température de 23°C est supposée sur tous les nœuds du mur multicouche. De plus, les conditions aux deux limites du mur multicouche sont des conditions mixtes (voir les équations III.5 et III.6). La température de l'air ambiant au milieu interne est supposée constante ($T_i = 23^\circ\text{C}$). Cette dernière représente la température de confort réglée sur le climatiseur. La limite extérieure est exposée à des températures et des radiations solaires variables en fonction du temps. La température Sol-Air, calculée par l'équation (II.5) est utilisée comme condition à la limite extérieure pour prendre en considération l'effet des radiations solaires sur le transfert de chaleur.

Les coefficients de transfert de chaleur combinés (convectifs et radiatifs) [80] à la surface du mur intérieur (h_i) et extérieur (h_o) sont respectivement 9 et 22 W / m²K. le coefficient d'absorption solaire est choisi égal à 0,8 (surfaces d'une couleur foncée). [97-99]. Les paramètres utilisés dans le calcul sont mentionnés dans le tableau IV.2.

Tableau IV. 2: Paramètres utilisés dans les calculs

Paramètres	Valeurs
Coût de l'électricité (\$/kWh)	0.04378 Dont 1\$=109,91 DA le 15-02-2017
Coefficient de performance, COP	2.5
Coût du polystyrène extrudé (\$/m ³) [100]	138.1213
Taux d'inflation, I (%) [101]	4.82
Taux d'intérêt, d (%) [102]	5.26
Durée de vie du bâtiment, n (Ans)	30

IV.3.Période de calcul :

Un deuxième code, programmé en Fortran, est conçu pour définir la période dont laquelle on va calculer les charges de climatisation par la méthode dynamique. Ces charges sont calculées initialement, du 1^{er} Janvier au 31 Décembre, par la méthode degrés-heures. On a conclu que la climatisation est nécessaire seulement durant les mois de Mai à Octobre (voir figure IV.2). Donc la période qui va être simulée numériquement par le deuxième code de calcul (méthode dynamique) sera limitée en six mois. Malgré l'imprécision des résultats de la méthode degrés-heures, qui néglige l'échauffement de l'enveloppe des bâtiments dû au rayonnement solaire pour le calcul des charges de climatisation, cette méthode nous a donné un aperçu sur l'ordre de grandeur de l'énergie consommée par la climatisation (charges de climatisation). D'après la figure IV.2, le mois le plus chaud, pour la région de Ouargla, est le mois de Juillet, par contre, le mois dont lequel les charges de climatisation sont minimales est le mois d'Octobre.

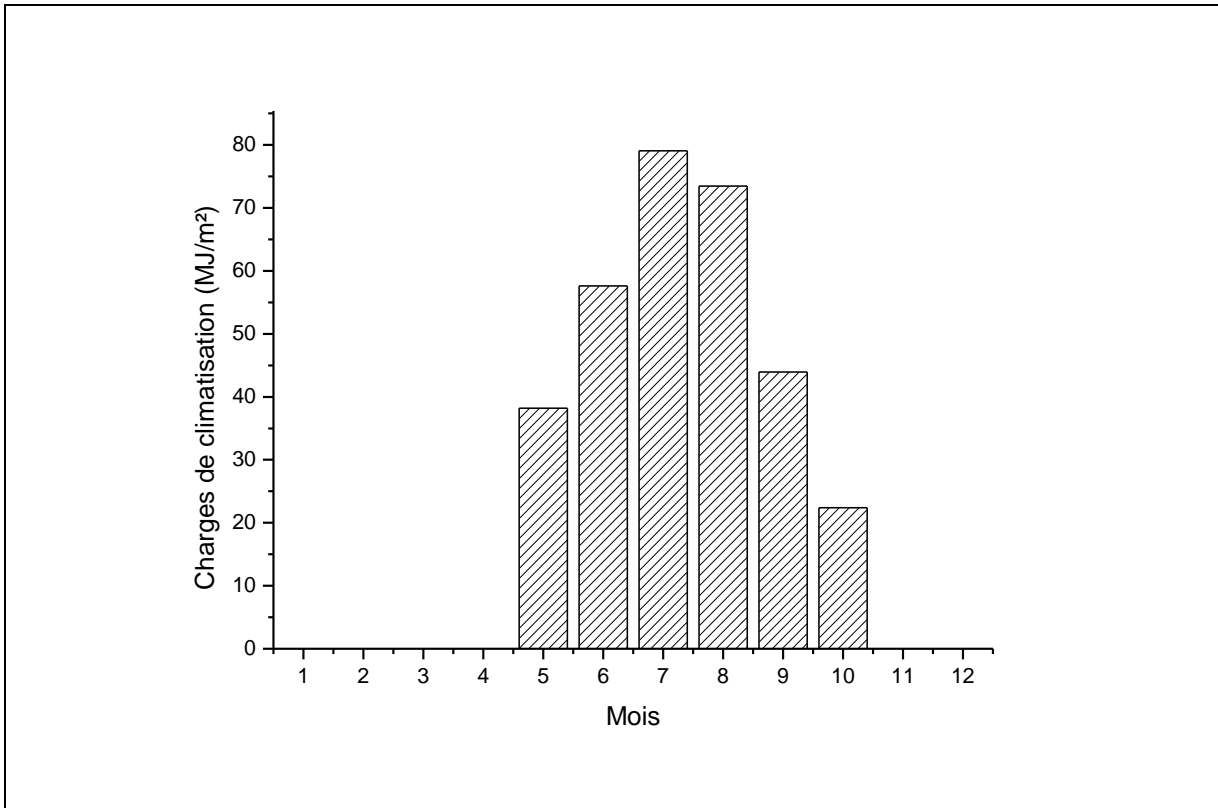


Figure IV. 2 Charges de climatisation pour chaque mois calculées par la méthode degrés-heures

IV.4.Procédure de calcul

Un code de calcul en Fortran a été développé pour calculer les charges de climatisation durant les six mois les plus chauds dans la région de Ouargla. Le transfert de chaleur instationnaire à travers le mur multicouche est considéré comme unidimensionnel. Le problème a été résolu numériquement par une méthode implicite de différences finies. Dans le cas d'utilisation des données météorologiques réelles, la simulation numérique est effectuée pour une période de six mois (184 jours), avec un pas de temps d'une heure, c'est-à-dire avec un nombre de pas de temps total égal à 4416 heures pour chaque pas d'épaisseur d'isolant. Si un jour typique est utilisé pour remplacer toute la période simulée, le nombre des pas de temps se réduit à 24 heures seulement. Le mur multicouche commence par 24 cm d'épaisseur (mur sans isolation), puis l'isolant est introduit avec un pas de 1 mm jusqu'à 150 mm. Les charges de climatisation dues au flux thermique qui traverse le mur du bâtiment, calculées pour une heure, sont additionnées pour obtenir les charges de climatisation globales pendant la période simulée. A chaque pas d'épaisseur d'isolant, une valeur différente de la charge de climatisation globale

est trouvée. Ces données sont utilisées pour calculer l'épaisseur d'isolation optimale, le coût annuel d'énergie économisée (la cotisation en énergie) et les périodes de récupération (Payback) en utilisant le modèle économique ; «analyse des coûts du cycle de vie » (Life-Cycle Cost Analysis).

IV.5. Résultats et discussions :

Les résultats obtenus dans cette étude sont divisés en trois parties, dans la première on va présenter les résultats de calcul de l'épaisseur optimale d'isolation en utilisant une condition réelle à la limite extérieure du mur (Données Météorologiques Réelles). Dans la deuxième partie, on va montrer les résultats obtenus par l'utilisation d'une condition périodique, ainsi que l'effet du choix entre le 15 ou le 21 Juillet comme jour type et l'effet des conditions initiales sur la précision des résultats. Dans la dernière partie, on va présenter les résultats obtenues par l'utilisation d'une condition périodique mais avec un jour type calculé par l'utilisation de l'algorithme **FFT**.

IV.5.1. Données Météorologiques Réelles (DMR)

Dans cette partie la température de l'air ambiant et la radiation solaire sont prises heure par heure durant les six mois les plus chauds dans la région de Ouargla et cela du premier Mai jusqu'à le 31 Octobre. Ces valeurs sont obtenues par le logiciel commercial "Meteonorm 7". Les valeurs moyennées, durant les années 2000 jusqu'à 2009, pour la température et durant 1991 jusqu'à 2010 pour le rayonnement solaire sont utilisées [103]. Meteonorm génère un fichier météorologique de la région choisie selon la position (horizontale ou verticale) et l'orientation du mur (Est, Ouest, Nord et Sud). Le fichier généré contient plusieurs variables météorologiques tels que la température de l'air ambiant, le rayonnement solaire (global, diffus et direct), la vitesse du vent, ..etc. Un 3^{ème} programme en langage Fortran est réalisé pour lire ; la température ambiante et le rayonnement solaire global, du fichier généré par Meteonorm puis, calculer, pour les 8760 heures de l'année, la température Sol-Air selon l'équation (II.5). Le programme ainsi réalisé va générer un fichier de données pour chaque orientation du mur.

La figure IV.3 représente les charges de climatisation de chaque mois de la période étudiée, pour un mur multicouches sans isolation, pour différentes orientations dans la région de Ouargla. On remarque que le mois de Juillet est le mois le plus chaud, dont la charge de

climatisation atteint jusqu'à $102,77 \text{ MJ/m}^2$ pour le mur Est et $100,96 \text{ MJ/m}^2$ pour le mur Ouest. L'effet de l'orientation est clairement visible d'un mur à un autre, où on peut remarquer que les valeurs des gains thermiques sont presque les mêmes pour les parois Est et Ouest, pour tous les mois simulés ; par contre, elles sont différentes pour les orientations Nord et Sud, sauf en mois de Juin et Juillet. Une différence maximale d'une valeur de $29,27 \text{ MJ/m}^2$ est remarquée pour le mois d'Octobre entre l'orientation Nord et Sud.

Les charges de climatisation globales en fonction des différentes épaisseurs de l'isolant (Polystyrène extrudé XPS) et pour différentes orientations sont représentées sur la figure IV.4. Ces charges sont inversement proportionnelles à l'épaisseur de l'isolant. Elles présentent des valeurs très importantes pour un mur sans isolation : 394.2, 428.91, 328.84 et 431.03 (MJ/m^2 année) pour les orientations Sud, Ouest, Nord et Est respectivement. Au début, une faible augmentation de l'épaisseur de l'isolant engendre une chute importante des charges de climatisation, puis, au-delà de 11 cm d'épaisseur de l'isolant, les charges de climatisation restent presque constantes. Les murs orientés vers l'Est et l'Ouest ont presque les mêmes charges de climatisation pour les six mois étudiés. Elles présentent les plus grandes valeurs des gains thermiques sauf pour les mois de Septembre et Octobre. Elles présentent les valeurs les plus faibles pour l'orientation Nord. D'après la figure IV.4, on remarque aussi, que l'effet de l'orientation sur les charges globales de climatisation est peu important, aussi bien, pour les grandes que pour les petites épaisseurs de l'isolant.

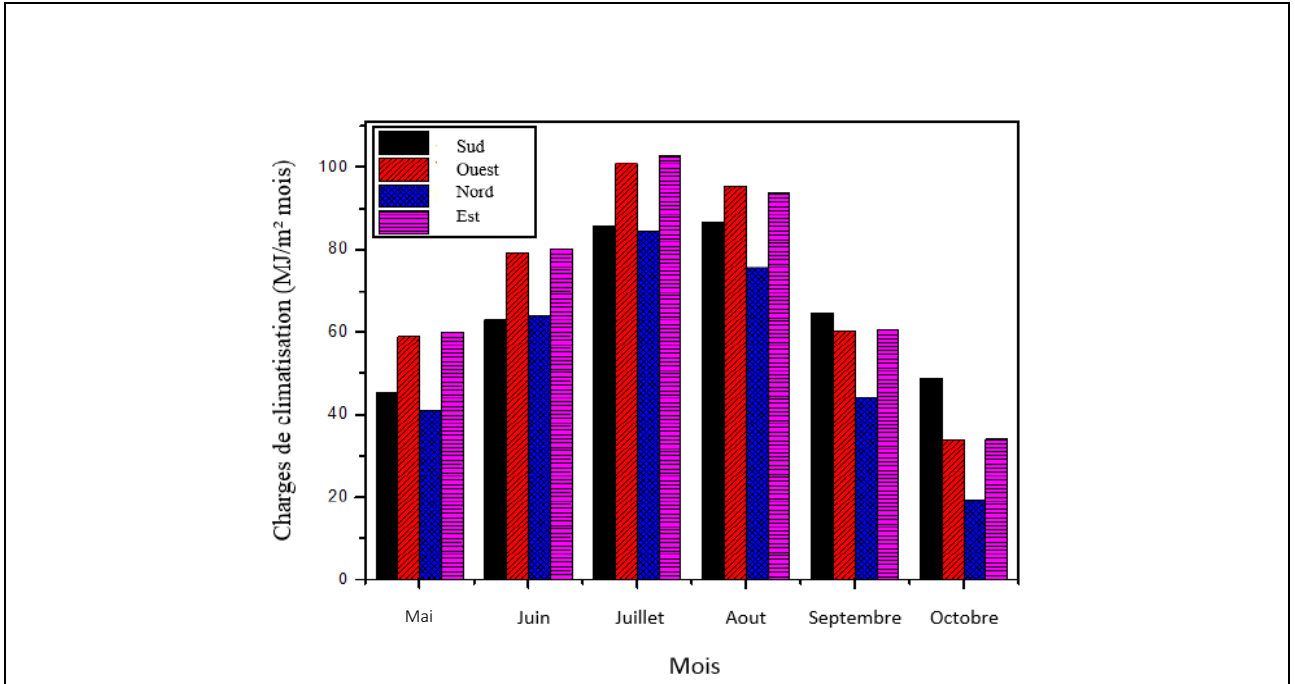


Figure IV. 3 Charges de climatisation mensuelles pour les quatre orientations d'un mur non isolé

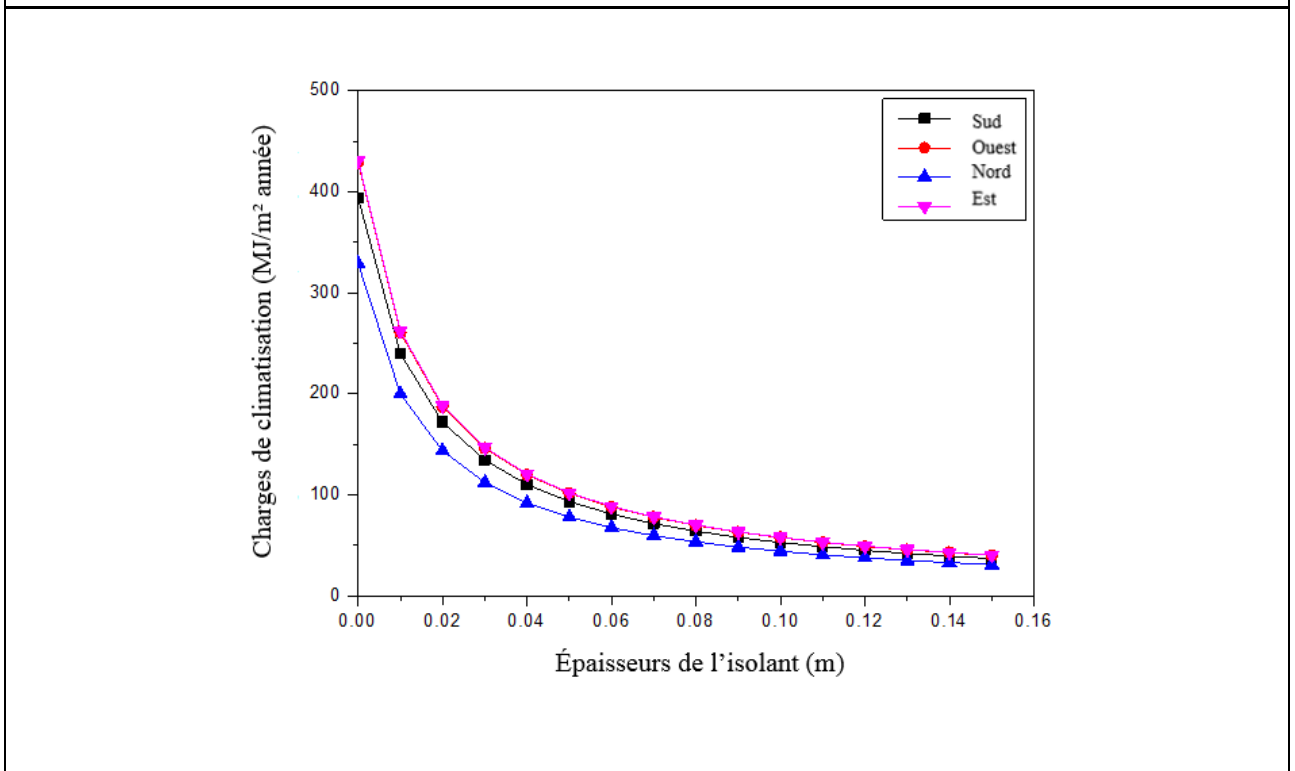


Figure IV. 4 Charges de climatisation globales pour les quatre orientations du mur multicouches

La figure IV.5 représente la variation des coûts de l'isolation, de l'énergie utilisée par la climatisation et du coût total, en fonction de l'épaisseur de l'isolant pour un mur orienté vers l'Est. On remarque que le coût de l'isolant augmente linéairement avec l'épaisseur de l'isolant, tandis que le coût de l'énergie diminue. La somme des coûts d'isolation et de l'énergie, représente le coût total ; qui diminue jusqu'à une certaine valeur de l'épaisseur de l'isolant puis augmente. Les profils des coûts de l'isolant, de l'énergie et du coût total ont les mêmes allures pour les autres orientations (Ouest, Nord et Sud). Dans cette étude on définit l'épaisseur optimale de l'isolation comme étant la valeur à laquelle correspond la plus petite valeur du coût total. Les valeurs minimales du coût total présenté dans la figure IV.6 correspondent aux épaisseurs optimales sont de : 0.067, 0.073, 0.062 et 0.073 m pour les orientations Sud, Ouest, Nord et Est respectivement.

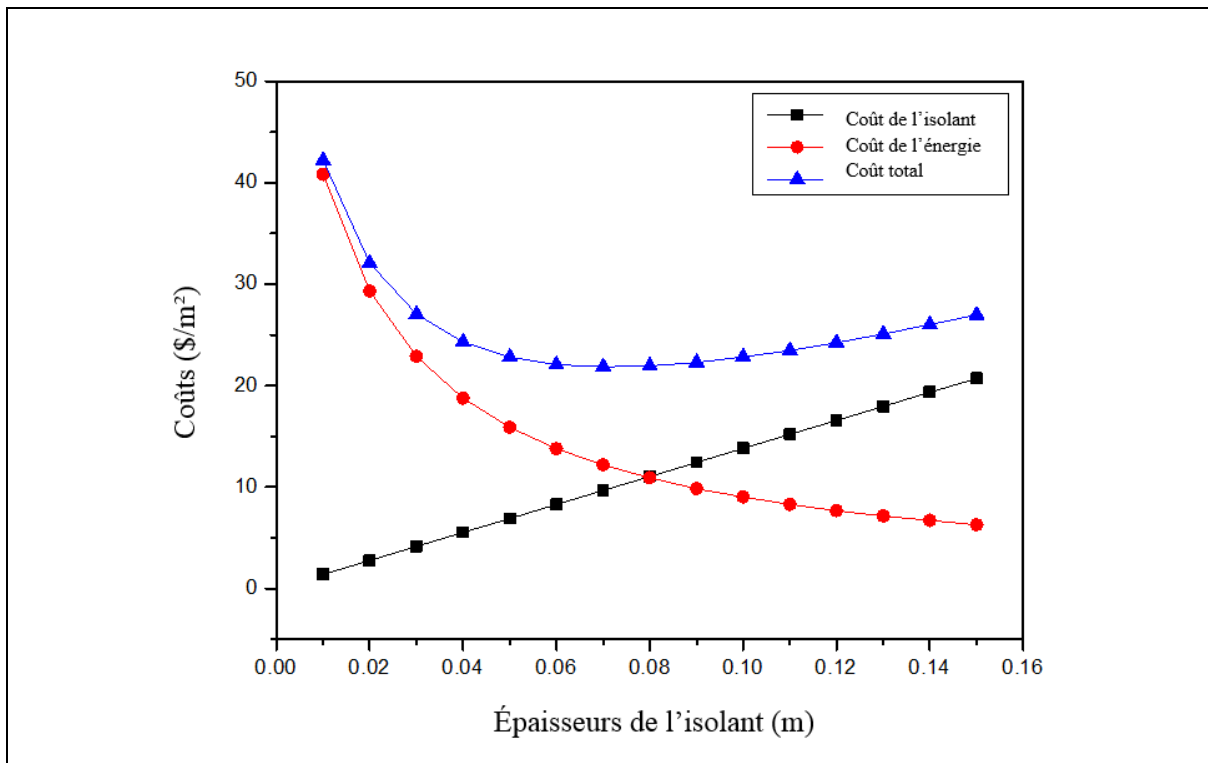


Figure IV. 5 Coûts de l'isolation, de l'énergie utilisée par la climatisation et du coût total pour un mur orienté vers l'Est

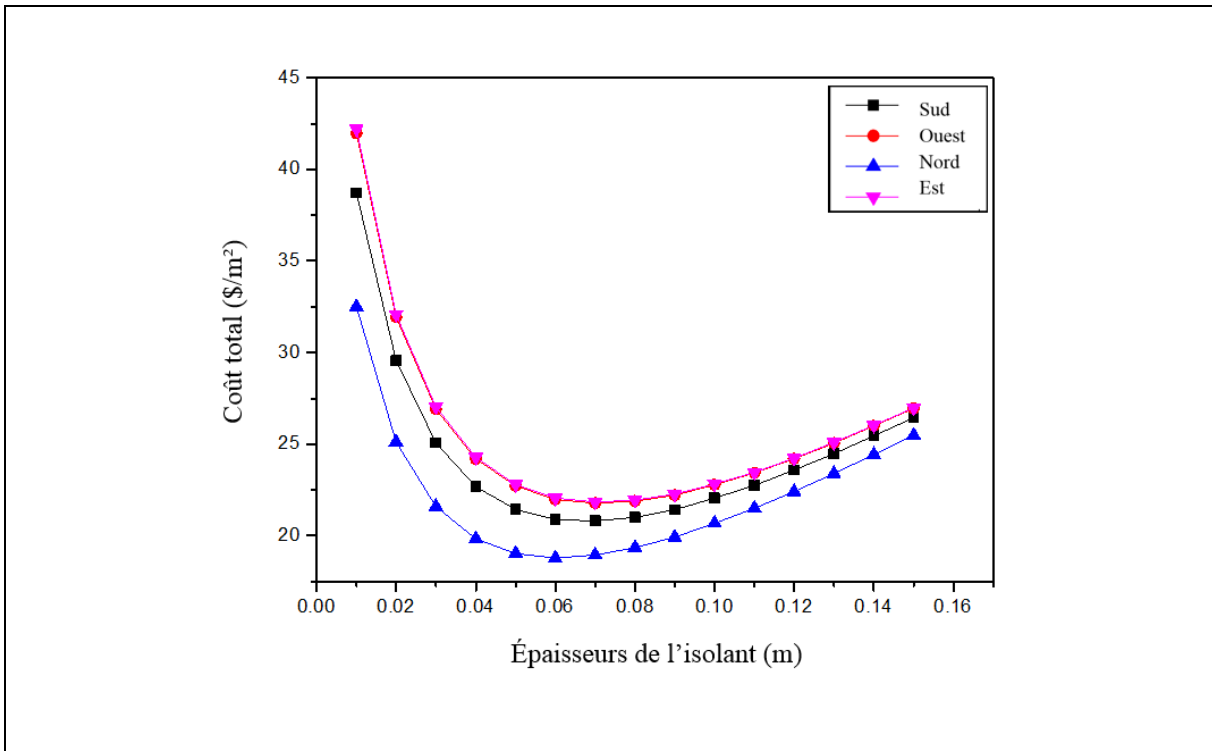


Figure IV. 6 Variation du coût total par rapport à l'épaisseur d'isolation pour toutes les orientations de mur

La somme des charges mensuelles de climatisation des quatre orientations, sans et avec épaisseur d'isolation optimale, sont représentées sur la figure IV.6. Une réduction très importante des charges de climatisation, pour un habitat isolé, est notée pour tous les mois avec une valeur minimale de 81,42% pour Septembre et une valeur maximale de 82,16% pour le mois de Mai. La réduction des apports de chaleur solaires contribue à stabiliser le climat ambiant en réduisant les fluctuations de température des milieux internes, et par conséquent, affect directement la consommation d'énergie électrique au niveau national, et réduit les pics de consommation dues à la climatisation d'été, qui sont la principale cause des coupures d'électricité et des chutes de tension en Algérie.

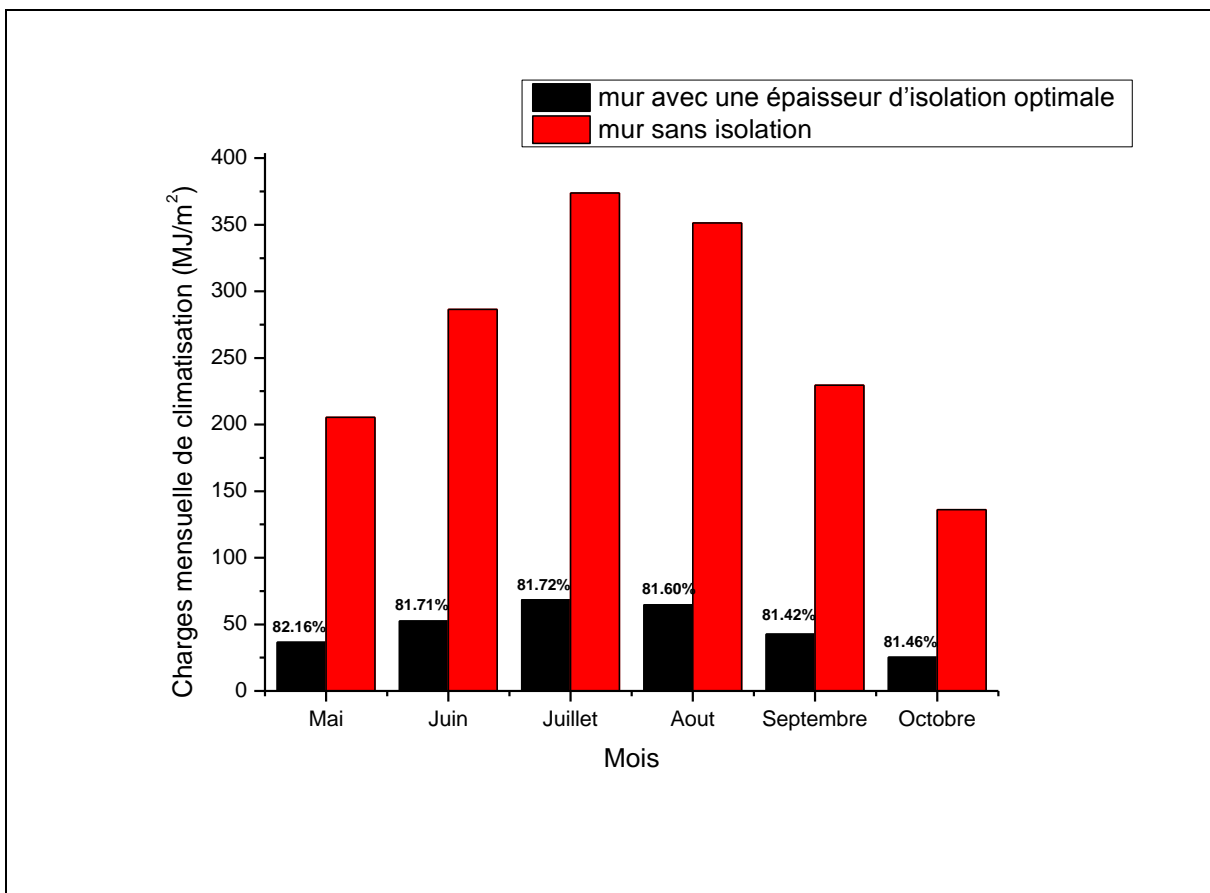


Figure IV. 7 Charges mensuelles de climatisation, sans et avec une épaisseur d'isolation optimale, des quatre orientations

La figure IV.8 représente la variation de l'énergie électrique économisée par mètre carré en fonction de l'épaisseur de l'isolation pour les quatre orientations. On remarque que l'orientation Est et Ouest représente les plus grandes économies en énergie avec un coût total cotisé durant 30 ans égal à 45,332 \$/m² et 45,066 \$/m² respectivement, tandis que les murs orientés vers le Nord et le Sud, ne représentent qu'un coût total cotisé de 32,462 \$/m² et 40,654\$/m² (voir Tableau IV.4).

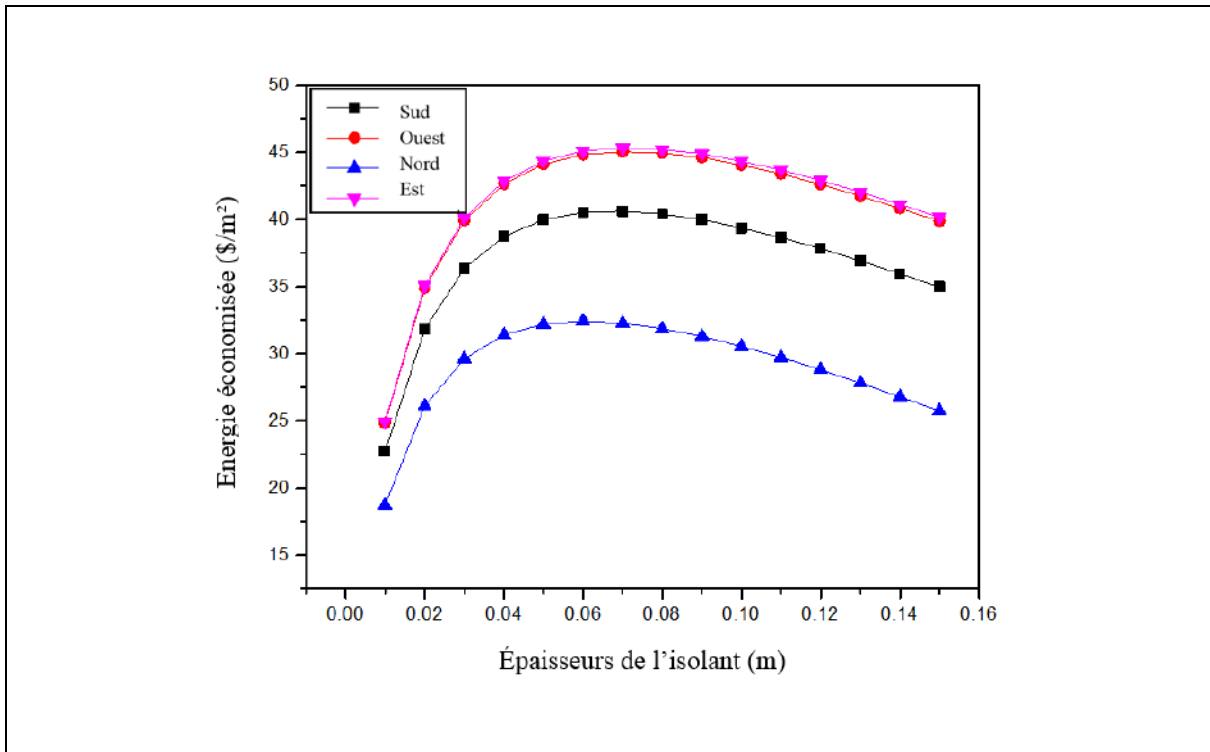


Figure IV. 8 Energie économisée pour toutes les orientations des murs

IV.5.2. Conditions périodiques :

Le seul problème rencontré lors de l'utilisation des données météorologiques réelles est le temps important de simulation. Dans notre étude, les calculs ont été réalisés sur un ordinateur portable doté d'un processeur Intel I3 Core TM, 2,53 GHz, 4 Go de RAM et d'un système d'exploitation 64 bits. La durée de simulation pour l'optimisation de l'épaisseur d'isolation à l'orientation EST est de 45,505 heures. Le calcul pour les autres orientations a pris un temps similaire.

Pour réduire le temps de calcul, toutes les études antérieures ont supposé que la condition aux limites sur la surface extérieure est périodique, c'est-à-dire simuler un seul jour type pour

toute la période étudiée. Parmi ces études, on trouve ceux qui ont utilisé le 15 juillet comme jour type et ceux qui ont utilisé le 21 juillet. Donc pour notre cas, au lieu de calculer les charges de climatisation durant 4416 heures, il suffit de les calculés durant 24 heures puis de multiplier le résultat par le nombre total des jours (six mois c.à.d. 184 jours).

Dans ce qui suit, nous allons représenter l'effet du choix entre le 15 et le 21 juillet comme jour représentatif, sur le temps de calcul et sur la précision des résultats.

a) Effets des conditions périodiques sur les résultats (15 ou 21 Juillet comme jour type) :

La figure IV.9 représente la variation de la température ambiante durant les 24 heures des deux journées types : 15 et 21 Juillet. Bien que le rayonnement solaire pour les deux jours types est presque le même (voir figure IV.10), la grande différence de la température ambiante, qui atteint jusqu'à 9,7°C entre les deux jours engendre une différence importante de la température Sol-Air (voir figure IV.11). Par conséquence, l'erreur lors du calcul des charges totales de climatisation sera amplifiée.

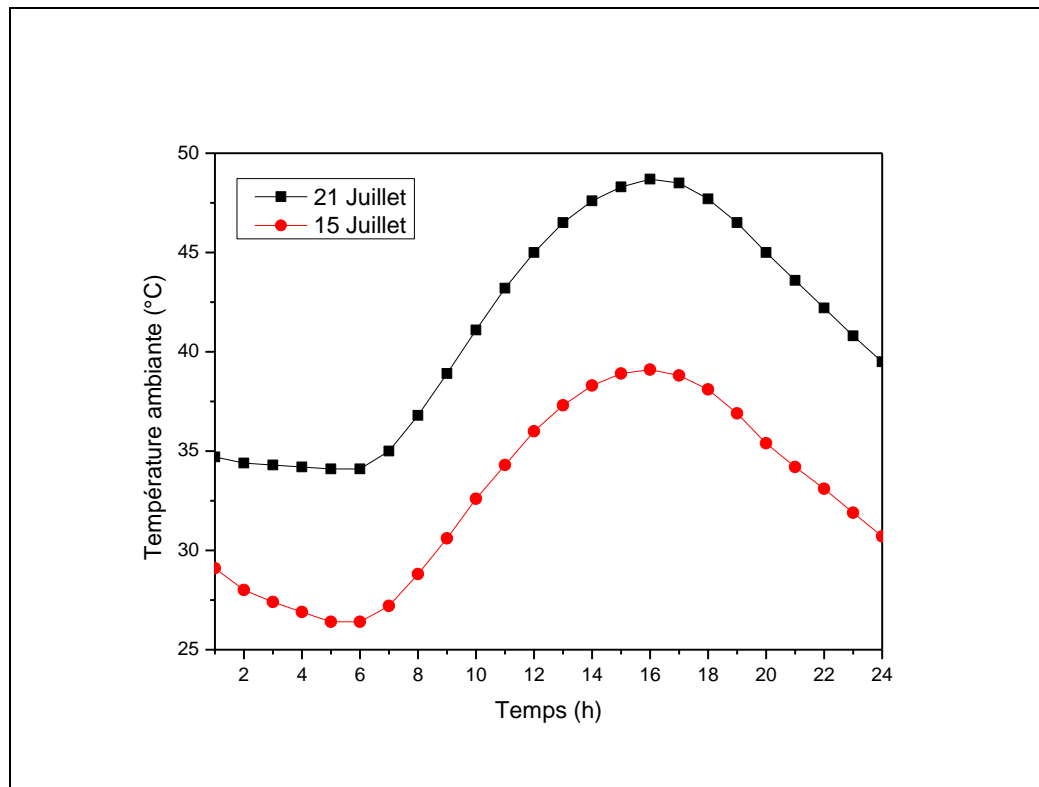


Figure IV. 9 Température ambiante de l'air du 15 et du 21 Juillet

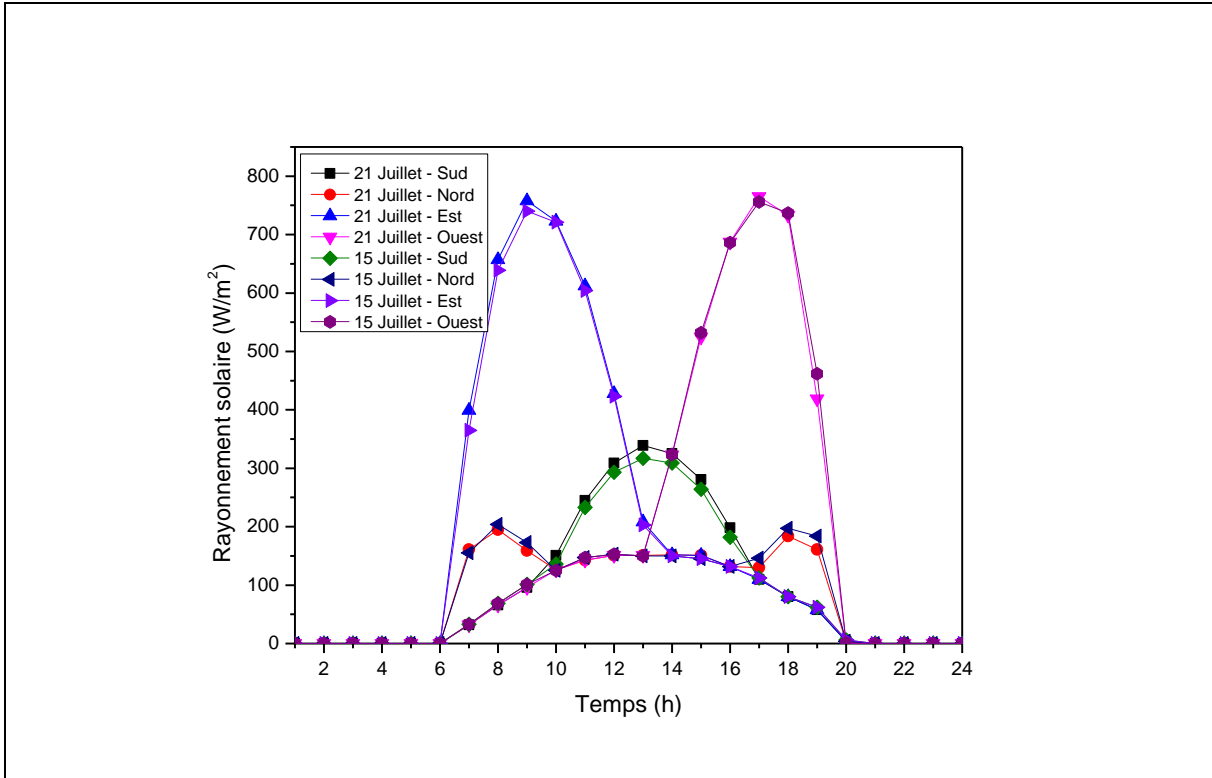


Figure IV. 10 Rayonnement solaire global pour toutes les orientations du 15 et du 21 Juillet

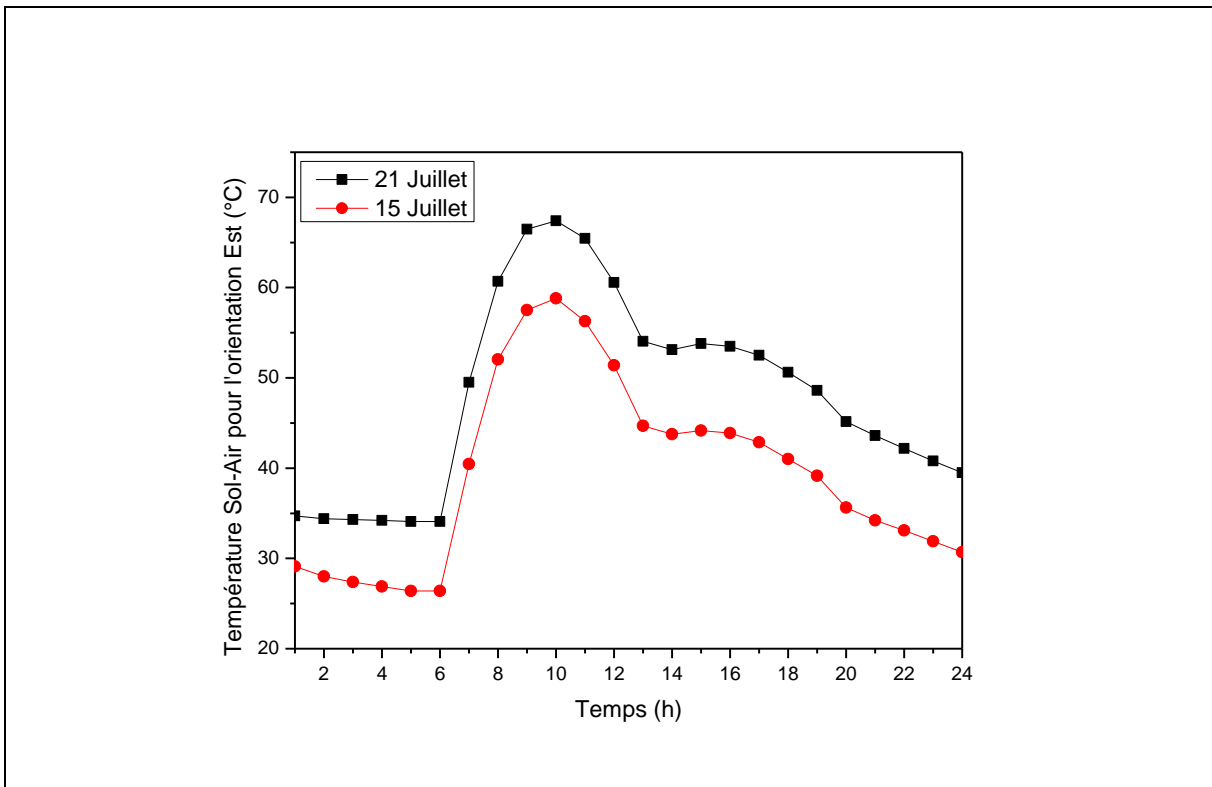


Figure IV. 11 Température Sol-Air pour l'orientation Est du 15 et du 21 Juillet

La variation des charges de climatisation globales obtenues par l'utilisation des données météorologiques réelles et par une condition périodique, pour un mur orienté vers l'Est, en fonction de l'épaisseur de l'isolation, est présentée dans la figure IV.12. On remarque clairement la grande différence des résultats entre le cas réel DMR et le cas approché (15 ou 21 Juillet comme jour typique). Une sous-estimation des charges de climatisation qui peut atteindre jusqu'à 73,05% pour le 15 Juillet et 59% pour le 21 Juillet est remarquée. Cette erreur va engendrer automatiquement une sous-estimation de l'épaisseur optimale de l'isolation. Cette remarque particulière pour un mur orienté vers l'Est reste valable pour toutes les autres orientations (voir Tableau IV.4).

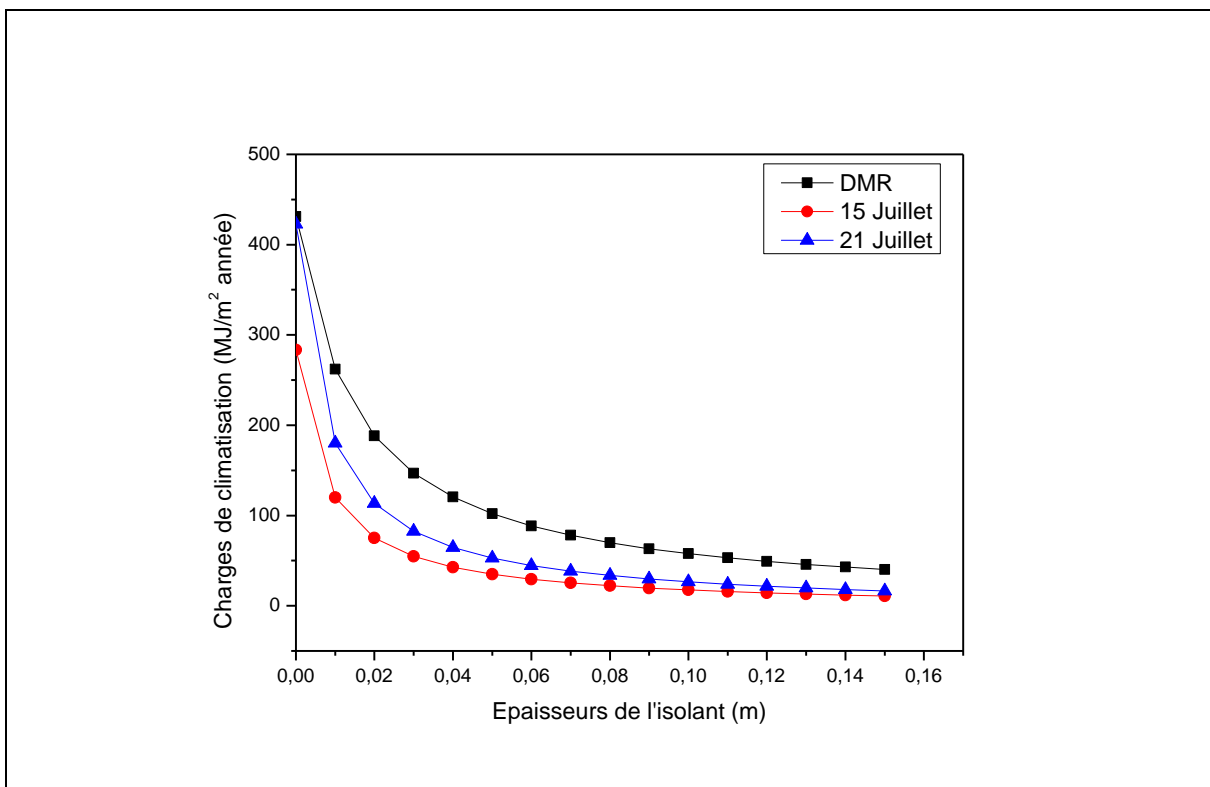


Figure IV. 12 Charges de climatisation annuelles pour le mur d'orientation Est

La variation du coût de l'énergie, utilisée pour dégager les gains de chaleur à travers le mur Est, par climatisation, en fonction de l'épaisseur de l'isolation, est présentée sur la figure IV.13. On remarque que les résultats obtenus par la condition périodique (15 ou 21 Juillet comme jour typique) sont très éloignés des résultats du cas réel (DMR). Une sous-estimation maximale du coût de l'énergie consommé par la climatisation est remarquée ; jusqu'à 45,90% pour le 15 Juillet et 45,86% pour le 21 Juillet.

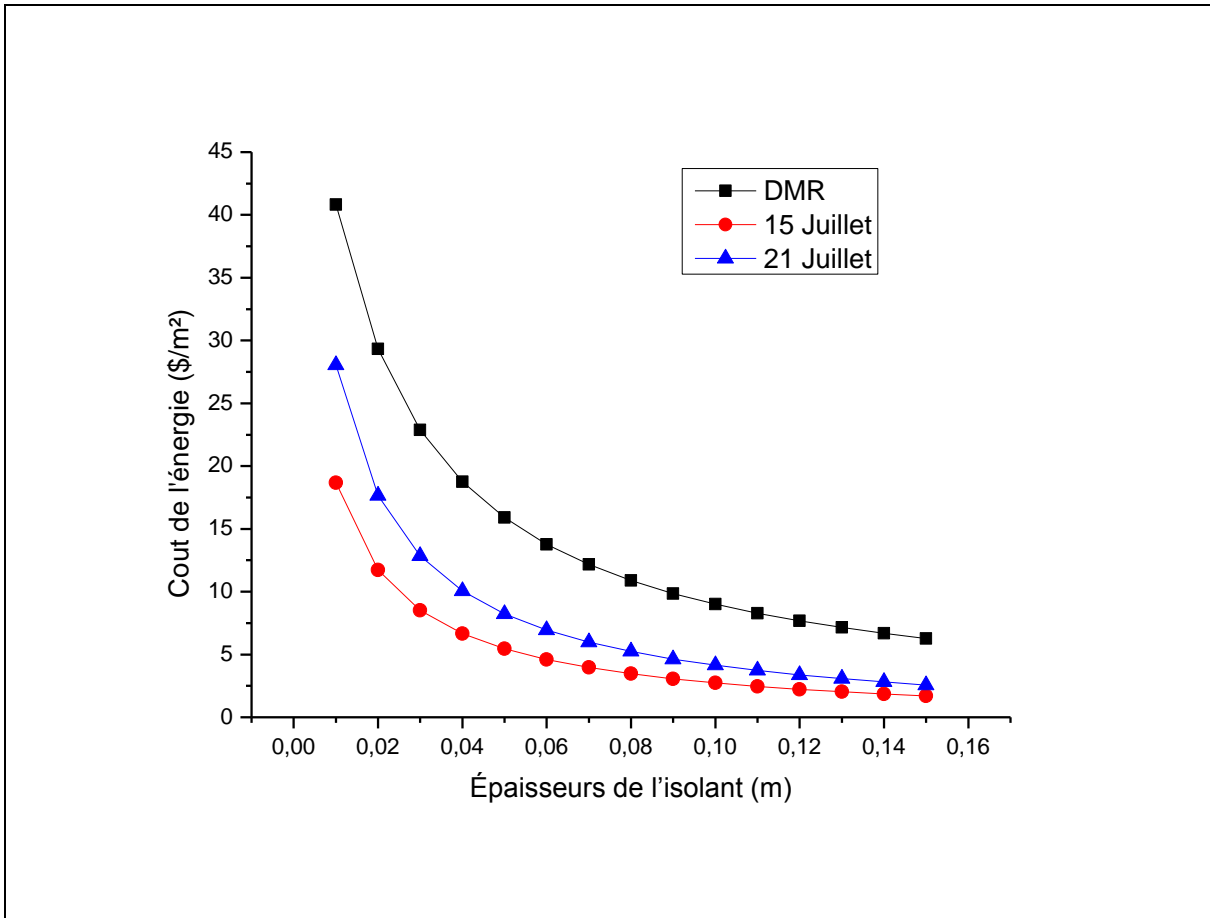


Figure IV. 13 Coût de l'énergie consommée par la climatisation pour l'orientation Est

b) Effets des conditions initiales sur les résultats :

D'après notre recherche bibliographique, on a remarqué que la majorité des études antérieures ne prend pas en considération l'effet des conditions initiales sur la précision des résultats. On vise dans cette partie, à quantifier ces erreurs, pour sensibiliser les chercheurs à ne pas négliger le traitement de tel phénomène. Pour que les charges de climatisation soient indépendantes des conditions initiales, un sous-programme est introduit dans le code de calcul pour trouver la différence relative entre les charges globales de climatisation calculées actuellement (Q_c^{New}) et calculées précédemment (Q_c^{Old}). La simulation numérique pour chaque épaisseur d'isolation, est répétée plusieurs fois, par l'utilisation des données climatiques du même jour type (15 ou 21 Juillet), jusqu'à ce que la charge de climatisation soit relativement constante (critère de stabilité $\varepsilon \leq 10^{-2} \%$; voir l'équation IV.1).

$$\varepsilon = \left| \frac{Q_c^{New} - Q_c^{Old}}{Q_c^{New}} \right| \times 100 \leq 10^{-2} \quad (IV.1)$$

Les mêmes résultats sont obtenus avec un temps de calcul plus important. Le tableau IV.3 représente les résultats de l'optimisation de l'épaisseur de l'isolation thermique d'un mur multicouches dont les caractéristiques géométrique et physique sont présentées dans la figure III.4 et le tableau III.2 (voir validation du programme dans le chapitre III). Deux critères de stabilité : $\varepsilon \leq 10^{-2} \%$ et $\varepsilon \leq 10^{-5} \%$ sont employés, pour une période de trois mois (du 1^{er} Juin au 31 Aout), où on peut remarquer que le temps de calcul est augmenté de 61,43% lorsqu'on augmente le critère de stabilité à 10⁻⁵%, par contre l'épaisseur optimale trouvée reste la même, avec une petite variation relative des charges de climatisation globales de 0,00375% pour un mur non isolé, et de 0,01123% pour un mur isolé avec une épaisseur d'isolation optimale.

Tableau IV. 3: Effet du critère de stabilité des conditions initiale sur les résultats

	Critère de stabilité des résultats égal à 10⁻²%	Critère de stabilité des résultats égal à 10⁻⁵%	Différence relative en %
Temps de calcul (secondes)	5537,30	8939,06	61,43
Nombre de répétitions	188	324	72,34
Epaisseur optimale L_{opt} (cm)	5,7	5,7	0
Charges de climatisation globales d'un mur sans isolation (MJ/m²)	469,633	469,686	0,01123
Charges de climatisation globales d'un mur avec L_{opt} d'isolation (MJ/m²)	219,646	219,654	0,00375

D'autre part, Tugce Pekdogan et Tahsin Basaran [5] ont imposé la différence relative de la température, au lieu de la différence des charges de climatisation, comme critère de stabilité, tel que :

$$\varepsilon = \left| \frac{T_n^{New} - T_n^{Old}}{T_n^{New}} \right| \times 100 \leq 0,5 \quad (IV.2)$$

Où T_n^{New} représente la température de la paroi interne du mur multicouche calculée par l'itération actuelle et T_n^{Old} la température de la paroi interne calculée par l'itération précédente.

Une comparaison entre les charges de climatisation globales des deux critères de stabilité (voir équations IV.1 et IV.2) en fonction de l'épaisseur de l'isolation est montrée dans la figure IV.14. Les deux critères de stabilité ont donnés presque le même résultat. Une petite amélioration de précision de 8,41% est remarquée lorsque les charges de climatisation sont prisent comme critère de stabilité, mais avec une augmentation du temps de calcul de 62,17%.

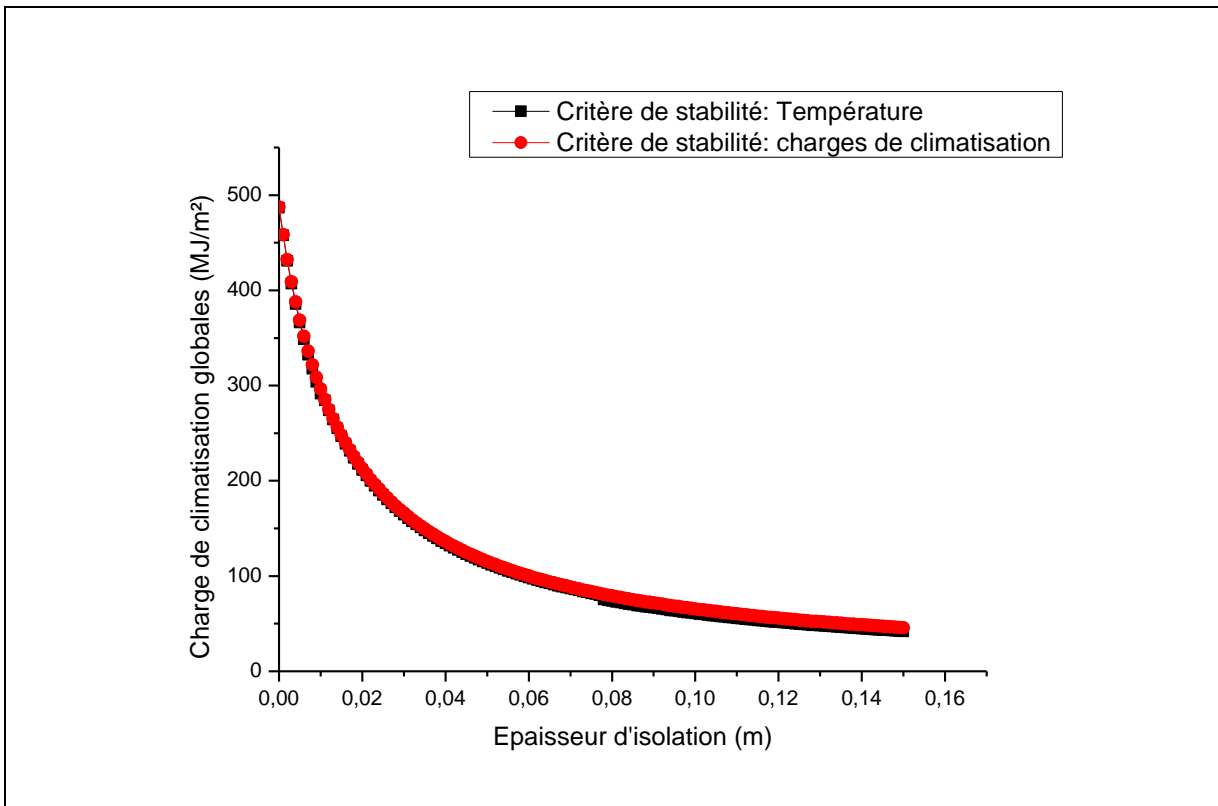


Figure IV. 14 Charges de climatisation globales pour différents critères de stabilité

La figure IV.15 représente une comparaison de la variation des charges de climatisation globales entre le cas réel (c.à.d. une période de 4416 heures) et le cas approximé (15 ou 21 Juillet comme journée type) pour l'orientation Est avec et sans répétition. On remarque que le jour type du 15 Juillet répété donne les résultats les plus proches du cas réel, avec une surestimation maximale des charges de climatisation égale à 13,23%. Par contre le choix du 21 Juillet avec répétition donne de très mauvais résultats, surestimées par rapport aux résultats réel (DMR) jusqu'à 73,08%. Les charges de refroidissement globales constituent l'élément fondamental pour calculer l'épaisseur d'isolation optimale, l'économie d'énergie et le délai de récupération (Payback). Par conséquent, toute erreur dans le calcul de ces charges, engendre directement des erreurs de calcul des autres quantités. L'effet des conditions initiales sur le résultat final est clairement visible sur la figure IV.15. On remarque une différence jusqu'à 76,2% pour le 15 juillet et jusqu'à 76,31% pour le 21 juillet, entre un jour typique répété et un autre non répété. L'élimination des effets des conditions initiales sur le résultat final, a amélioré la précision des résultats pour le choix du 15 Juillet comme jour typique. D'autre part, le temps de calcul est minimisé considérablement par rapport au cas réel (DMR). Il est réduit jusqu'à 98,8% pour les deux cas du 15 et 21 Juillet sans répétition et jusqu'à 90,8% pour le 15 et le 21 Juillet avec répétition. Les résultats discutés ici ne concernent que le mur orienté vers l'Est, les résultats pour les autres orientations sont similaires.

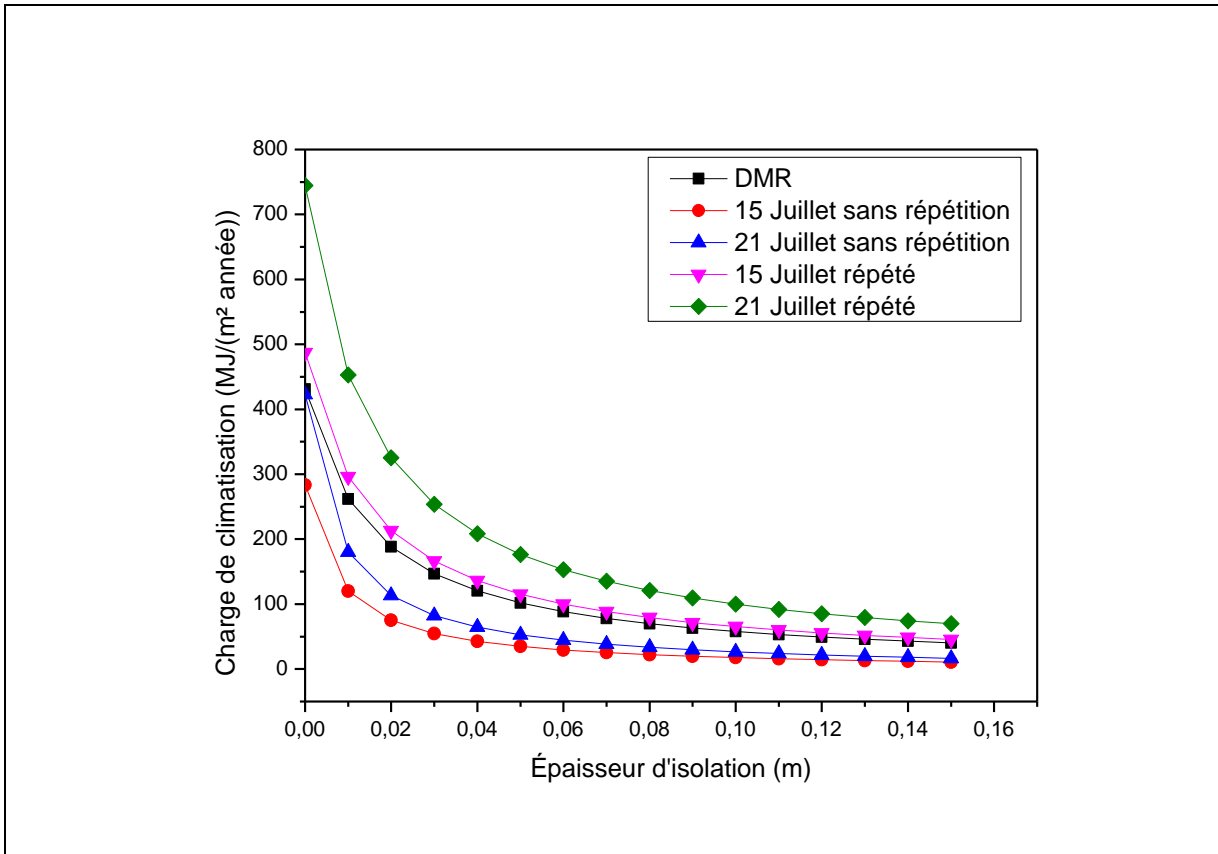


Figure IV. 15 Charges de climatisation globales pour un mur orienté vers l'Est

Les mêmes remarques sur la figure IV.15 restent valables pour la figure IV.16 qui représente la variation du prix total, de l'énergie, et de l'isolation, en fonction de l'épaisseur de l'isolation. Les données acquises par l'utilisation du 15 Juillet avec répétition, comme jour représentatif donne les résultats les plus approchés du cas réel (DMR). Pour les deux figures IV.15 et IV.16, on remarque que l'influence des conditions initiales sur la précision des résultats, diminue chaque fois que l'épaisseur de l'isolation est augmentée.

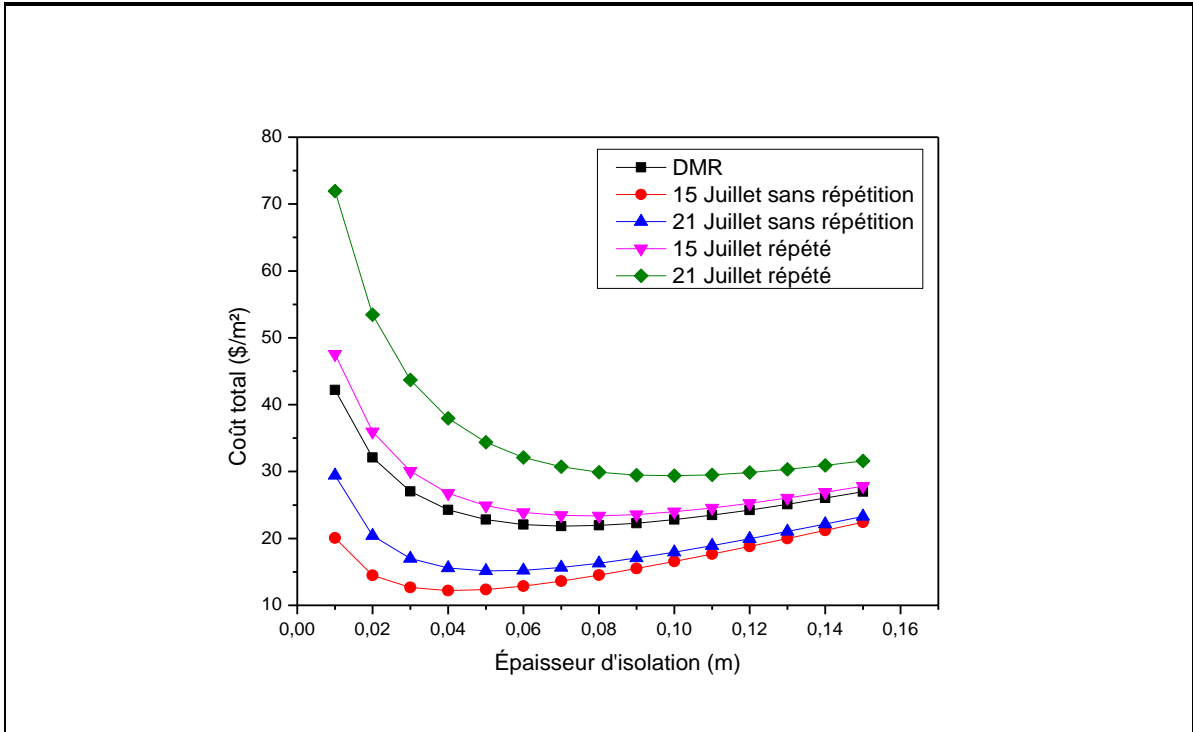


Figure IV. 16 Coût total pour l'orientation Est

L'influence du choix des conditions initiales sur les charges de climatisation globales avec une épaisseur d'isolation optimale pour toutes les orientations, est présentée dans la figure IV.17. La précision des résultats varie d'une orientation à une autre. Le jour type du 15 juillet répété donne toujours les meilleurs résultats pour les quatre orientations. Une différence maximale de 9,76% est constatée sur l'orientation Nord par rapport au cas réel (DMR). D'autre part, le résultat le plus proche du cas réel est trouvé pour l'orientation Sud avec une différence relative de 1,14%.

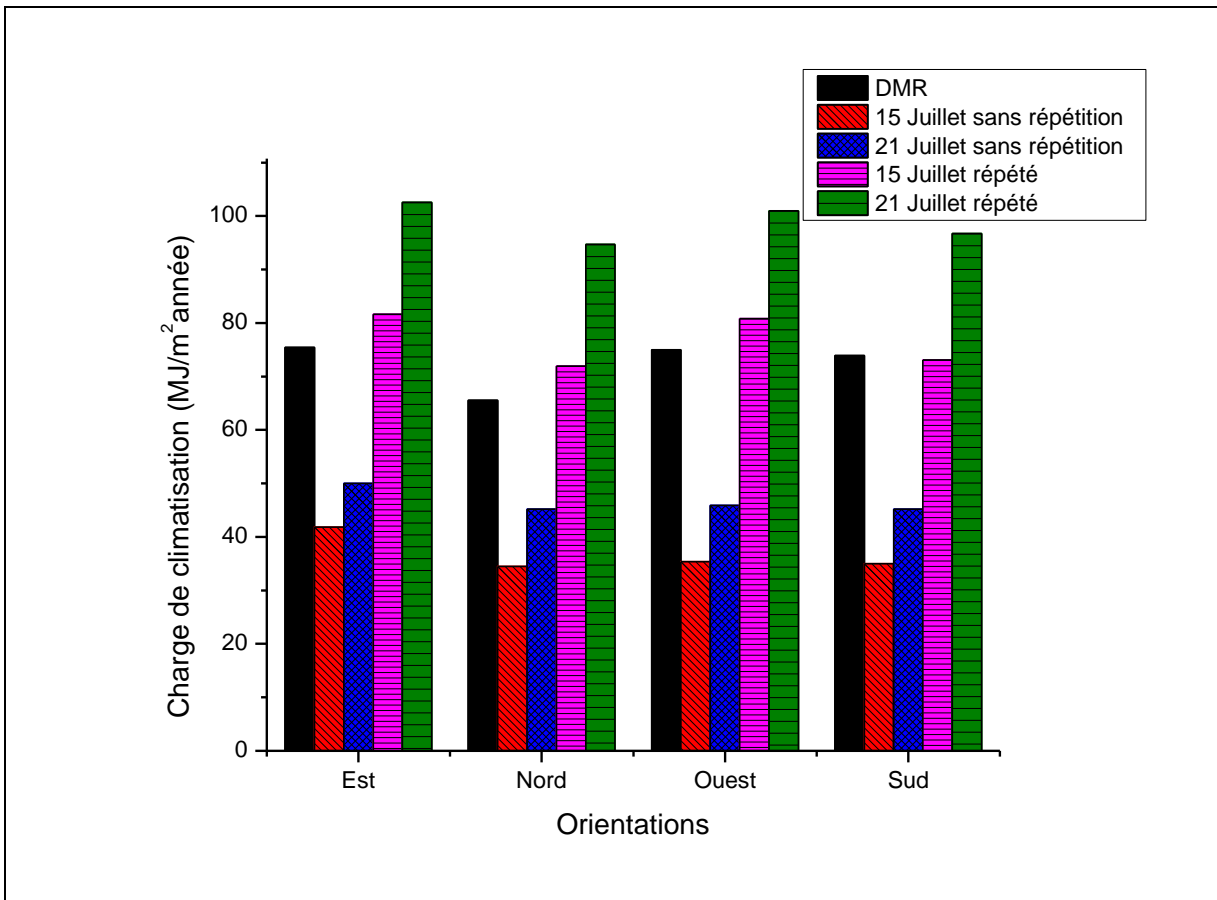


Figure IV. 17 Charges de climatisation globales pour toutes les orientations, avec et sans traitement des conditions initiales, d'un mur avec une épaisseur d'isolation optimale

Les erreurs de calcul des charges de refroidissement dues à l'effet des conditions initiales affectent directement le calcul de l'épaisseur optimale de l'isolation pour les quatre murs du bâtiment. Une erreur de 50,75% (voir Fig. IV.18) est remarquée pour le jour typique du 15 juillet, ce qui confirme l'importance des effets des conditions initiales sur la précision des calculs et par conséquent sur la quantité d'énergie qu'on peut économiser.

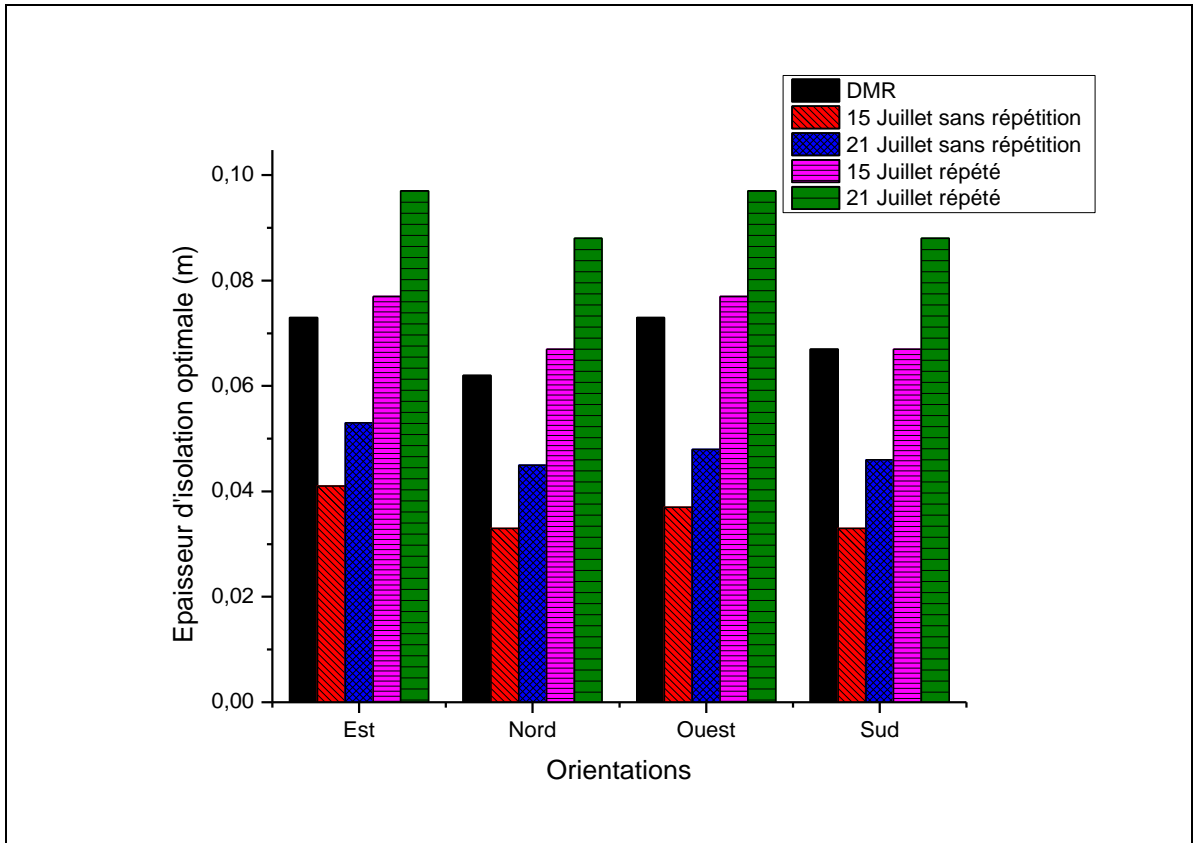


Figure IV. 18 Epaisseur optimale d'isolation pour toutes les orientations avec et sans traitement des conditions initiales

A cause des conditions climatiques qui se diffèrent d'une région à une autre, le choix du 15 Juillet comme jour type, ne donne pas toujours le même taux de précision des résultats.. La figure IV.19 représente les charges de climatisation d'un mur sans isolation, orienté vers l'Est pour différents régions en Algérie. On remarque que le choix du 15 Juillet comme jour type donne des résultats plus précis que le choix du 21 Juillet. Cette remarque n'est valable que pour les trois régions étudiées seulement (Ouargla, Adrar et Bechar), elle ne peut être généralisée sauf si le même résultat est approuvé pour différentes régions dans le monde. On remarque clairement que la précision des résultats varie considérablement d'une région à une autre pour les deux jours type : 15 et 21 Juillet. Pour les trois régions étudiées ; Ouargla, Adrar et Bechar, la charge annuelle de climatisation pour un mur non isolé orienté vers l'Est est sous ou surestimée de 13.07%, 14.75% et 37.22% pour le choix du 15 Juillet comme jour type et de 72.71%, 49.40% et 67.44% pour le choix du 21 Juillet.

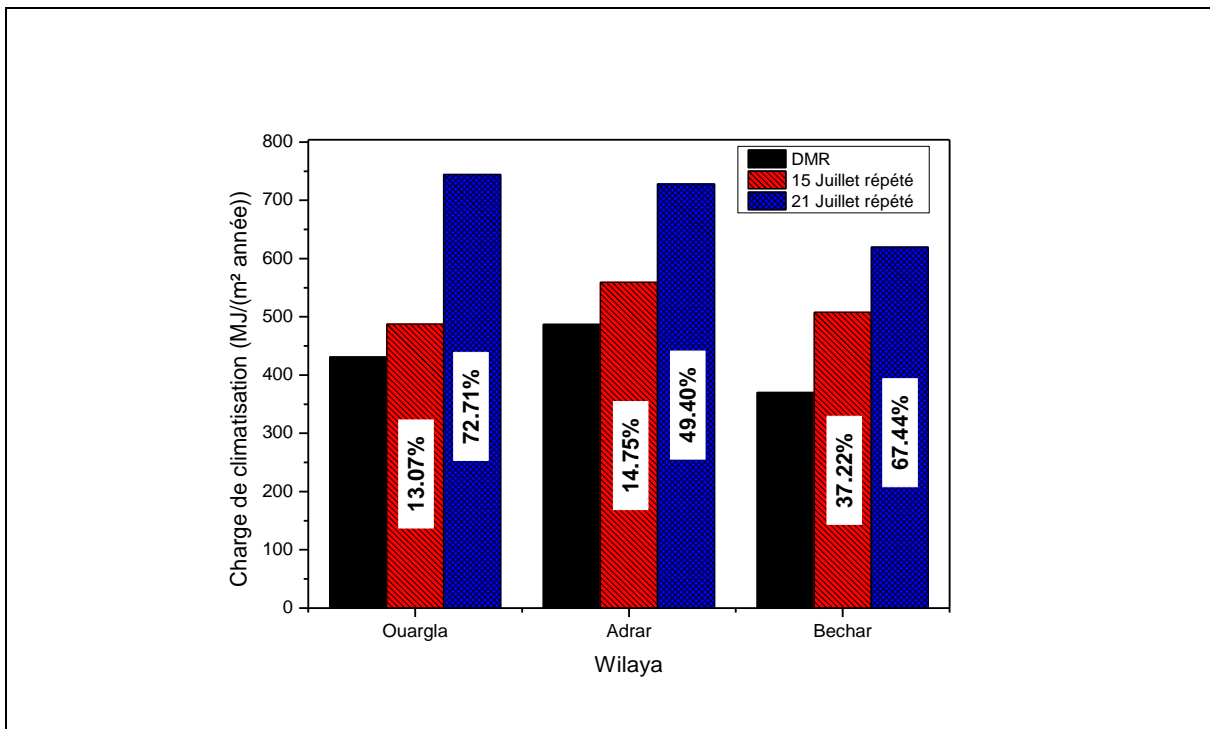


Figure IV. 19 Charges de climatisation globales d'un mur sans isolation orienté vers l'Est et pour différentes régions

IV.6. Amélioration des résultats par l'utilisation de l'algorithme FFT :

Le choix du 15 ou du 21 juillet comme jour typique de toute la période simulée pour calculer les charges globales de climatisation, n'a pas donné des résultats précis. La précision des résultats changes d'une orientation à une autre (voir figures. IV.17, IV.18 et le Tableau IV.4) et d'une région à une autre (voir figure IV.19). Pour cela, on propose dans cette partie, une nouvelle technique permettant de calculer un jour typique de l'ensemble de la période étudié (6 mois dans notre cas), en utilisant l'algorithme **FFT**. D'après notre recherche bibliographique cet algorithme, couramment utilisé en traitement numérique du signal [104], n'a jamais été utilisé auparavant pour calculer le jour typique.

IV.6.1. Théorème de Fourier :

Tout signal à temps continu « $s(t)$ » périodique de fréquence f_1 peut s'écrire sous la forme d'une somme de signaux sinusoïdaux comme suit :[105]

$$s(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} A_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (\text{IV.3})$$

Où

A_0 : la valeur moyenne du signal

A_n et f_n : représente l'amplitude et la fréquence de l'harmonique d'ordre n

φ_n : Phase de l'harmonique d'ordre n ($\varphi_n=0$)

t : le temps

IV.6.2. Analyse spectrale de la température Sol-Air :

Après l'utilisation de l'algorithme FFT inclus dans le logiciel commercial Ansys Fluent [106], on a tracé les spectres de la température $T_{\text{sol-air}}$ dans la figure IV.20. On a supposé que la température périodique dominante durant la période étudiée se compose seulement de la valeur moyenne du signal plus l'harmonique fondamental d'ordre 1.

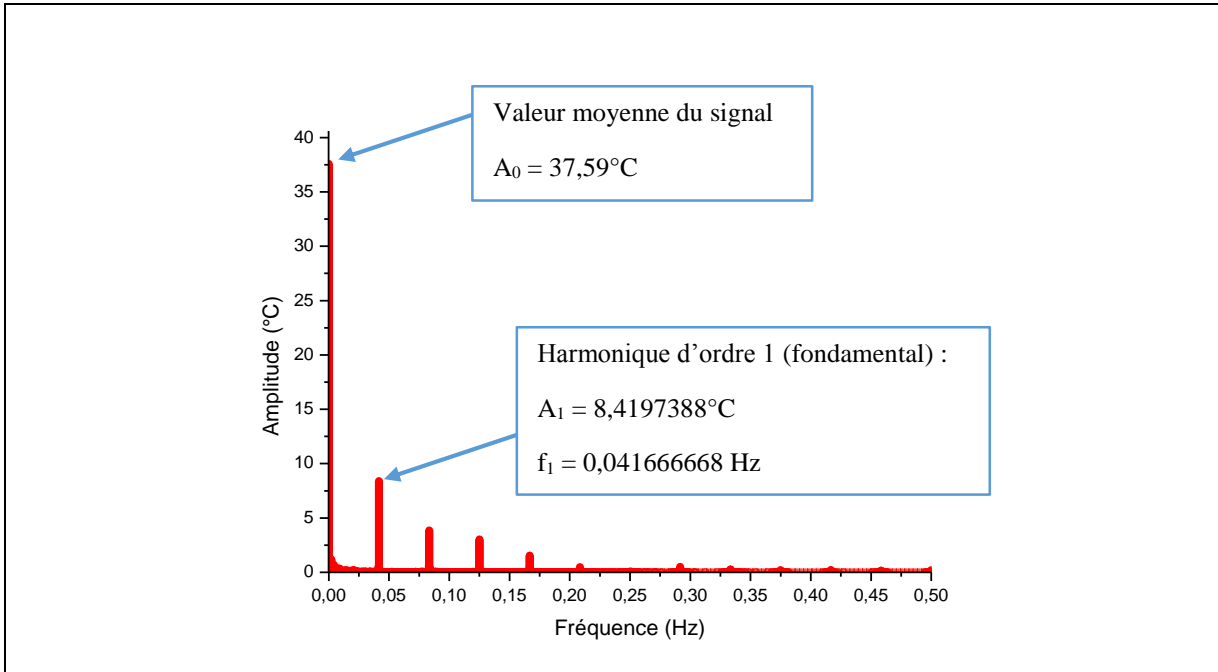


Figure IV. 20 Spectres de la température $T_{\text{sol-air}}$ de la période étudiée entre le 1^{er} Mai jusqu'à le 31 Octobre.

La figure IV.21 représente la variation des températures des trois premiers jours du mois de Mai : $T_{\text{sol-air}}$ réelle, $T_{\text{sol-air}}$ calculée par l'algorithme FFT et la température ambiante de l'air, pour un mur orienté vers l'Est. On remarque clairement la grande différence, entre la température ambiante et la température équivalente $T_{\text{sol-air}}$, due au rayonnement solaire. Les deux températures sont identiques entre minuit et 6 h du matin et entre 8 h du soir et minuit, où aucun rayonnement solaire n'est exposé au mur. La température $T_{\text{sol-air}}$ maximale est remarquée à 10 h lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires au mur. La température calculée par l'algorithme FFT est une fonction cosinusoidale. Elle représente une moyenne, entre la température $T_{\text{sol-air}}$ réelle et la température de l'air ambiant.

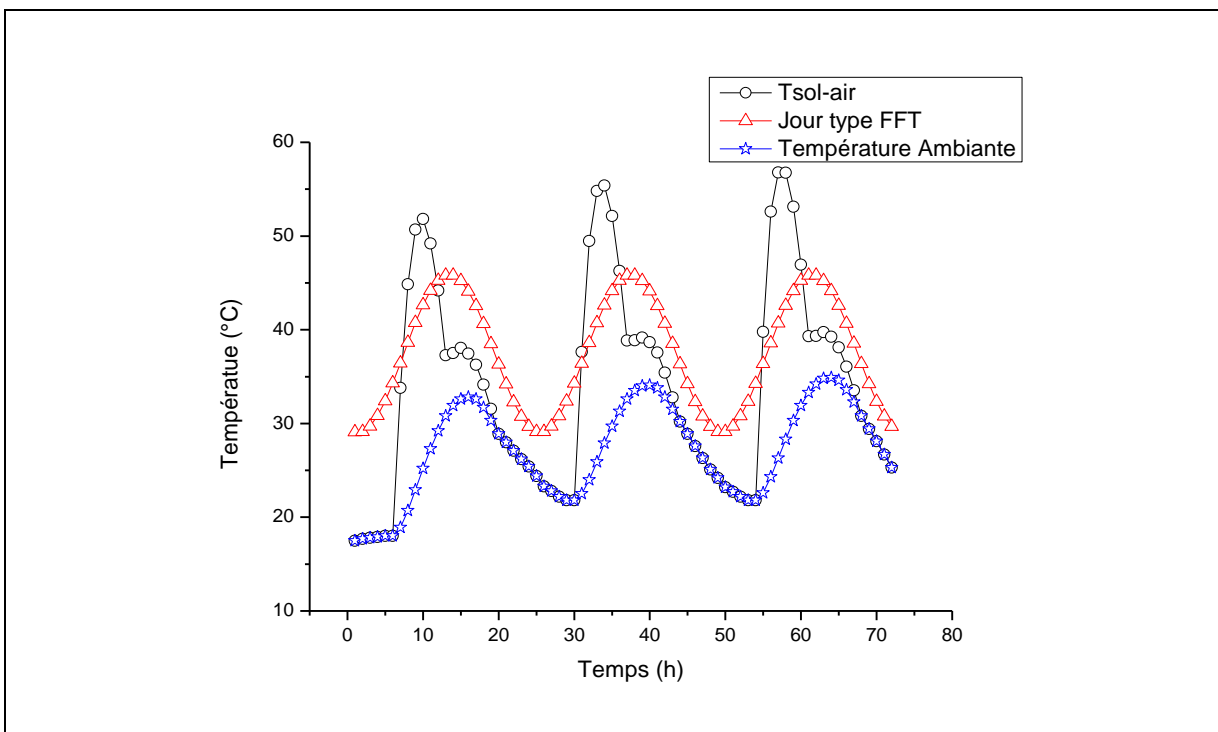


Figure IV. 21 Températures $T_{\text{sol-air}}$ réelle, calculée par l'algorithme FFT et la température de l'air ambiant pour l'orientation Est

La figure IV.22 représente une comparaison entre les jours types utilisés usuellement dans les recherches antérieures (le 15 et le 21 Juillet) et le jour type calculé par l'algorithme FFT. On remarque clairement la grande différence entre les trois jours typiques, ce qui va engendrer automatiquement une grande différence entre les charges de climatisation. Le jour type qui va nous donner des charges de climatisation les plus proches du cas réel, sera le jour le plus convenable au calcul de l'épaisseur optimale de l'isolation.

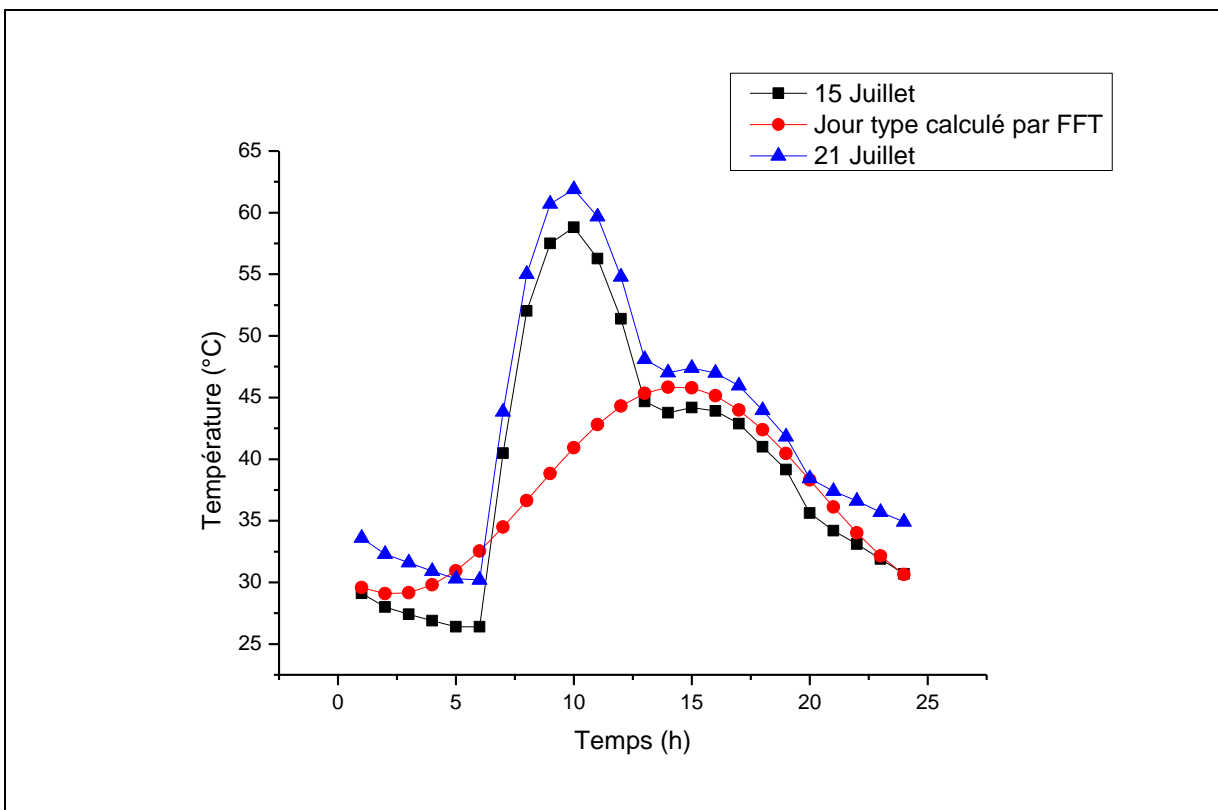


Figure IV. 22 Température $T_{\text{sol-air}}$ du 15, du 21 Juillet et du jour type calculé par l'algorithme FFT

La variation de la température $T_{\text{sol-air}}$ durant toute la période étudiée, ainsi que le jour type calculé par l'algorithme FFT, pour un mur orienté vers l'Est sont présentés dans la figure IV.23. La durée de la période étudiée s'étend du 1^{er} Mai qui correspond à l'heure 2881 de l'année, au 31 Octobre qui correspond à l'heure 7296 de l'année. On remarque que la température $T_{\text{sol-air}}$ varie entre un minimum de 13,6°C et un maximum de 67,72°C tandis que la température calculée par l'algorithme FFT est une fonction cosinusoidale qui varie entre 29,045 et 45,88°C. La température sol-air maximale correspond à l'heure 4858 de l'année ce qui coïncide au 21 Juillet à 10h du matin. C'est le jour le plus chaud de l'année, ce qui explique les valeurs surestimées des charges de climatisation, trouvées pour un jour type du 21 Juillet (voir les figures IV.17, IV.18 et IV.19).

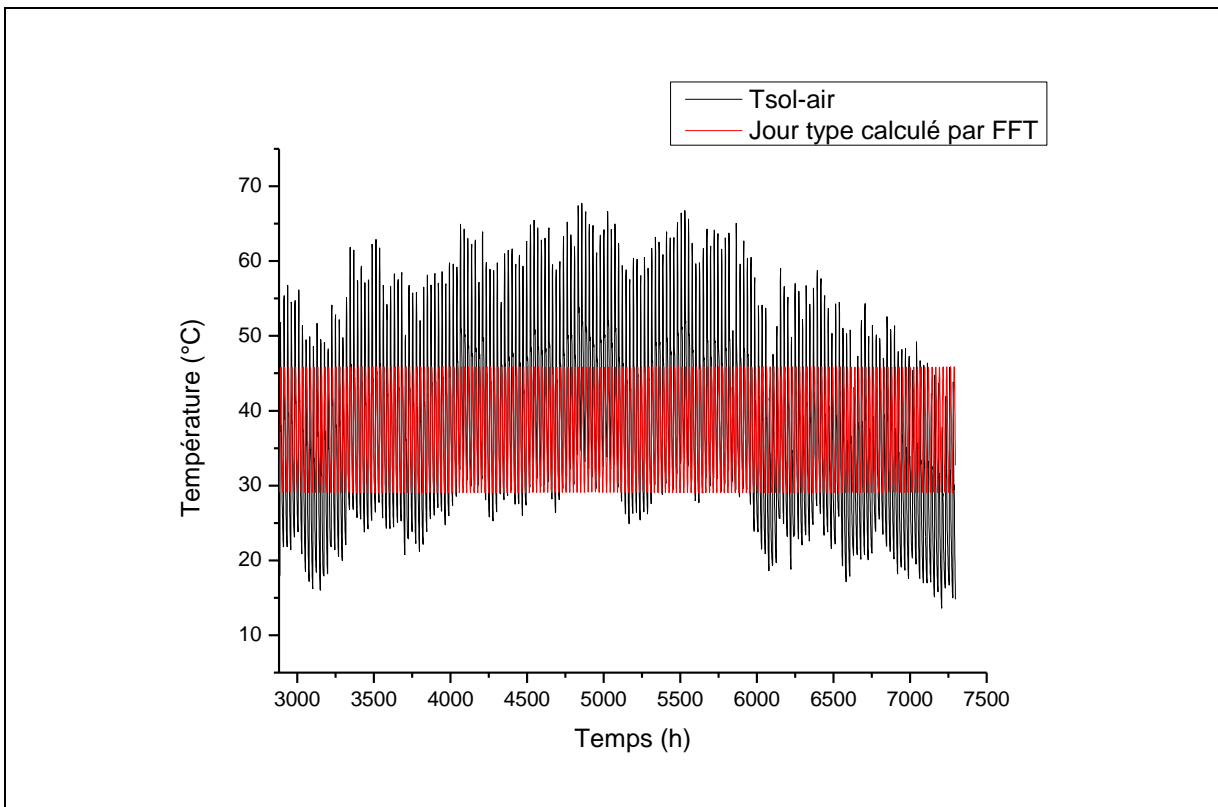


Figure IV. 23 Température calculer par l'algorithme FFT et la température sol-air durant six mois

La figure IV.24 représente la variation des charges de climatisation globales d'un mur orienté vers l'Est en fonction de l'épaisseur de l'isolation. Deux jours typiques ont été comparés avec le cas réel (DMR) : le 15 Juillet et le jour type calculé par l'utilisant de l'algorithme FFT, avec et sans répétition. On remarque clairement que les résultats obtenus par l'utilisation du jour type calculé par l'algorithme FFT répété, sont les plus précis. Il ne représente qu'une différence maximale de 0,35% par rapport aux charges de climatisation réelles (DMR). D'autre part, on remarque que l'effet des conditions initiales est très important, il augmente l'écart entre les résultats obtenues par l'utilisation du jour type calculé par l'algorithme FFT (sans répétition) et le cas réel (DMR) jusqu'à 71,45 %.

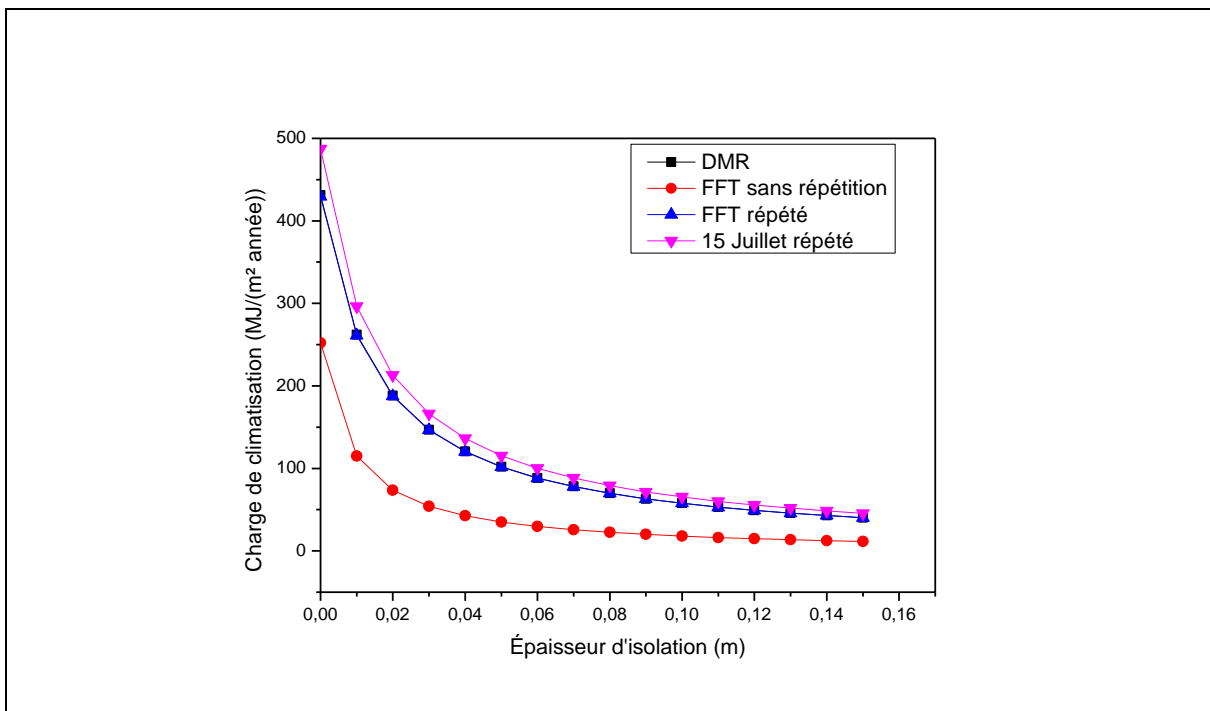


Figure IV. 24 Charges de climatisation globales du mur orienté vers l'Est

L'utilisation d'un jour type calculé par l'algorithme FFT donne des résultats précis pour toutes les orientations (voir figure IV.25). La différence relative maximale des charges de climatisation, en utilisant ce jour typique, par rapport au cas réel (DMR) reste très faible. Elle est remarquée pour l'orientation Nord, d'une valeur de 0,83% seulement ; par contre elle est de 92,52% pour le 21 Juillet et de 16,47% pour le 15 Juillet et cela pour la même orientation Nord.

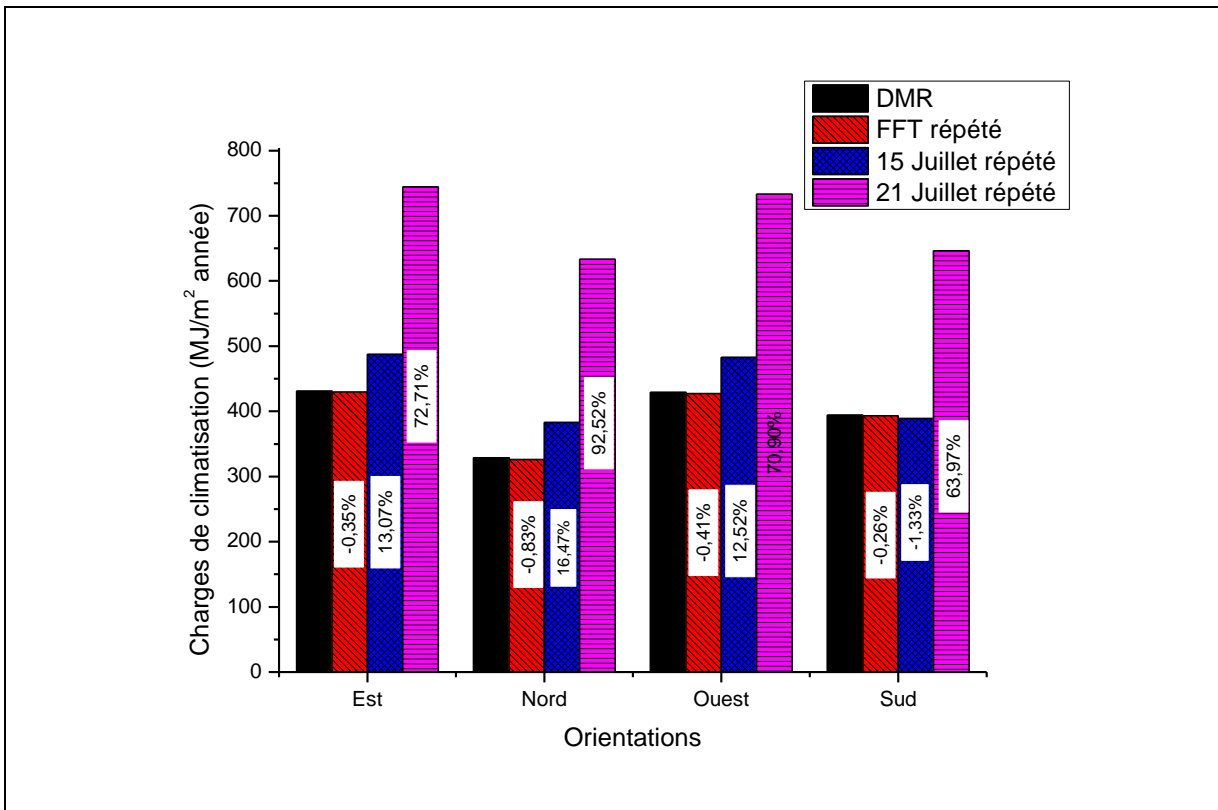


Figure IV. 25 Charges de climatisation globales pour les différentes orientations d'un mur sans isolation dans la région de Ouargla

La précision des résultats donnés par l'utilisation d'un jour typique calculé par l'algorithme FFT reste très fiable même si on change la région (différents conditions météorologiques). Cette remarque est clairement visible sur la figure IV.26. On remarque que les différences relatives des charges de climatisation demeurent négligeables, entre les résultats obtenues par un jour type calculé par l'algorithme FFT (avec répétition) et le cas réel (DMR), pour les régions : Ouargla, Adrar et Bechar. Elles sont respectivement de 0,35%, 0,24% et 0,88%. En outre, le temps de calcul est réduit de 45,505 heures à 4,212 heures seulement, ce qui représente un taux de réduction relatif de 90,74% (voir tableau IV.4).

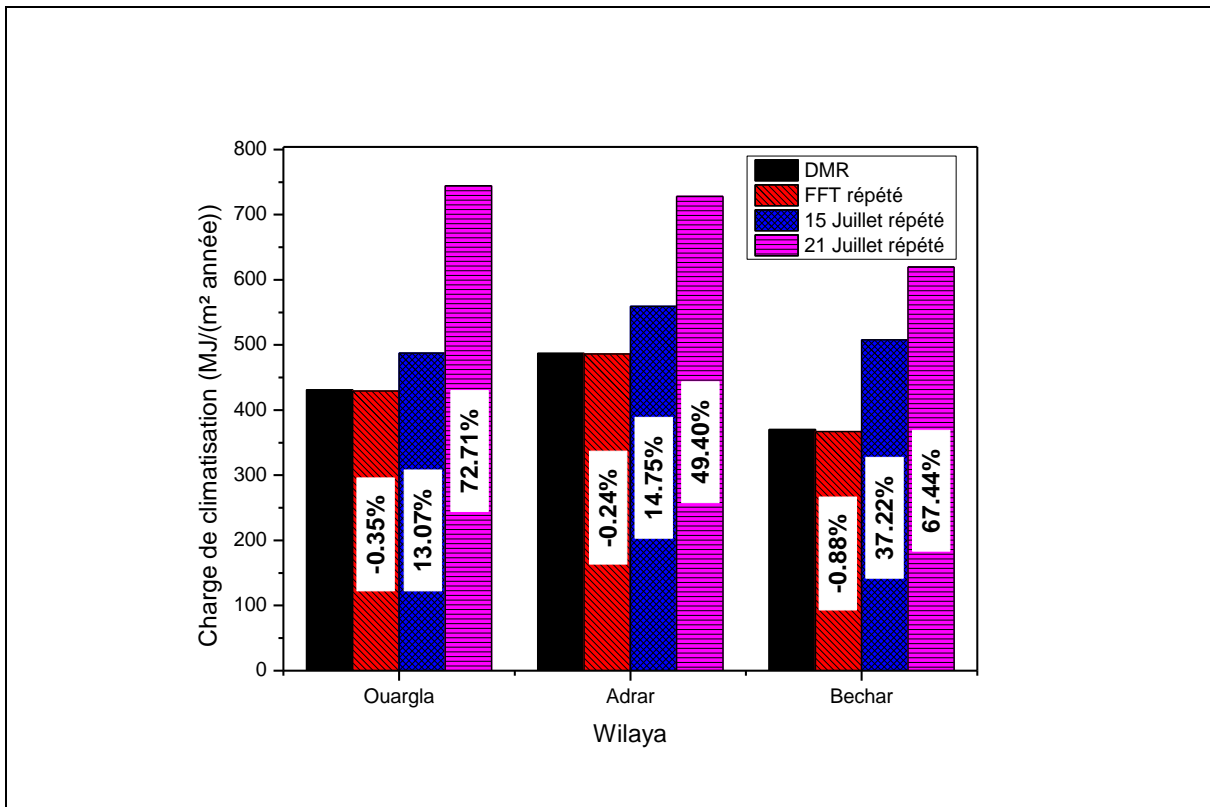


Figure IV. 26 Charges de climatisation globales pour différentes régions d'un mur sans isolation orienté vers l'Est

Tableau IV. 4: Résultats pour différentes orientations du mur

	Orientations	DMR	FFT	15 Juillet	21 Juillet
Temps de calcul (h)	Est	45,505	4,212	4,1848	4,2676
Epaisseur optimale d'isolation L_{opt} (m)	Est	0,073	0,073	0,077	0,097
	Nord	0,062	0,060	0,067	0,088
	Ouest	0,073	0,0730	0,0770	0,0970
	Sud	0,067	0,0670	0,0670	0,0880
Coût total cotisé durant la durée de vie du bâtiment (\$/m ²) pour L_{opt}	Est	45,332	45,125	52,588	86,629
	Nord	32,462	32,094	39,216	71,738
	Ouest	45,066	44,817	51,972	85,091
	Sud	40,654	40,500	39,968	73,499
Charge de climatisation annuelle sans isolation MJ/(m ² année)	Est	431,0318	429,5392	487,3521	744,4482
	Nord	328,8376	326,1203	383,0114	633,0921
	Ouest	428,9096	427,1436	482,5968	732,9941
	Sud	394,2020	393,1674	388,9549	646,3793
Charge de climatisation annuelle avec isolation MJ/(m ² année) pour L_{opt}	Est	75,4072	75,2428	81,6188	102,5312
	Nord	65,5522	66,9727	71,9541	94,7108
	Ouest	74,9932	74,8225	80,8169	100,9469
	Sud	73,9149	73,8674	73,0718	96,7006
Payback (années)	Est	5,7466	5,7679	5,3177	4,2437
	Nord	6,5809	6,4717	6,0264	4,5870
	Ouest	5,7740	5,7998	5,3694	4,3094
	Sud	5,8549	5,8727	5,9355	4,4936

IV.7. Etude comparative de nos résultats avec d'autres études :

IV.7.1. Comparaison avec différentes régions caractérisées par un climat chaud :

Une comparaison de nos résultats avec des études antérieures, concernant le calcul de l'épaisseur optimal de l'isolation, pour des régions caractérisées par un climat chaud, est présentée dans le tableau IV.5. Les études choisies pour la comparaison, ont utilisées un modèle de transfert de chaleur dynamique, pour calculer les charges de climatisation et / ou de chauffage, avec l'utilisation d'une condition périodique. D'après notre recherche bibliographique, aucune étude antérieur n'a estimé les charges de climatisation et / ou de chauffage en utilisant des données météorologiques réelles, ou en utilisant l'algorithme FFT. A l'exception de Daouas N, qui n'a pas précisé les jours types utilisés dans son étude, les autres auteurs, ont choisi ; parfois le 15^{ème}, et parfois le 21^{ème} jour de chaque mois, comme jour typique.

Du tableau IV.5 on remarque qu'indépendamment de la région étudiée, les orientations Est et Ouest sont caractérisées par une énergie économisée plus importante et une épaisseur optimale d'isolation plus épaisse, par rapport aux autres orientations. On peut remarquer aussi, que l'énergie économisée pour la région de Ouargla est très importante. Cela est, probablement, dû aux conditions climatiques agressives qui caractérisent l'été de cette Wilaya. Il faut bien noter, que l'énergie économisée, calculée pour cette région, peut être beaucoup plus importante si le prix réel de l'électricité, au lieu du prix soutenu par l'Etat, est pris en considération.

Tableau IV. 5: Comparaison avec des études précédentes pour des climats chauds

Etude	Région	Zones climatique	Jour type	Charges de climatisation et/ou de chauffage	Orientations	Epaisseur optimale d'isolation (cm)	Coût total cotisé (\$/m ²)
Présente étude [107]	Ouargla, Algérie	chaud et sec (climat désertique)	DMR	Climatisation	Sud	6,7	40,65
					Nord	6,2	32,46
					Est	7,3	45,33
					Ouest	7,3	45,06
Maryam Dlimi [108]	Errachidia Maroc	climat désertique chaud	le 15ème jour de chaque mois	Climatisation et chauffage	Sud Nord Est Ouest	6 4 6 6	/ / / /
Ozel, M [29]	Antalya, Turquie	étés chauds et secs	le 15ème jour de chaque mois d'été	Climatisation	Sud Nord Est/Ouest	3,6 3,1 4,0	25,86 18,55 31,55
S. A. Al-Sanea and M. F. Zedan [30, 50]	Riyadh, Arabie Saoudite	climat désertique chaud	le 21ème jour de chaque mois de l'année	Climatisation et chauffage	Sud Nord Est Ouest	8,75 8,88 9,20 9,25	/ / / /
Daouas, N [17]	Tunisie	été chaud (climat méditerranéen)	Un jour typique pour les mois de l'été (Juin) et une pour les mois de l'hiver (Janvier)	Climatisation et chauffage	Sud	10,1	13,07
					Nord	10,1	12,64
					Est	11,7	16,88
					Ouest	11,6	16,71

IV.7.2. Effet de l'orientation du mur sur l'optimisation de l'épaisseur d'isolation pour différentes régions :

Le tableau IV.6 illustre les résultats des études antérieures, concernant l'effet de l'orientation des murs des bâtiments, sur l'optimisation de l'épaisseur de l'isolation. Toutes ces études ont utilisées un modèle de transfert de chaleur dynamique pour calculer les charges de climatisation et/ou de chauffage, par l'utilisation d'une condition périodique. Ozel, M [29] a mentionné précédemment, dans une comparaison similaire, que la plus petite épaisseur d'isolation est toujours remarquée pour une orientation Nord, si seules les charges de climatisation sont présent en compte, et pour une orientation Sud, si l'ensemble des charges de climatisation et de chauffage sont présent en compte. Par contre, on peut voir clairement, sur notre étude comparative, que l'orientation Nord donne l'épaisseur d'isolation optimale la plus faible dans tous les cas. En plus, cette étude comparative, nous a montré l'importance de l'énergie économisée après isolation des murs, pour la région de Ouargla.

Tableau IV. 6: Effet de l'orientation du mur sur l'optimisation de l'épaisseur d'isolation pour différentes régions

Etude	Région	Jour type	Charges	Orientations	Epaisseur optimale d'isolation (cm)	Coût total cotisé (\$/m²)
Présente étude [107]	Ouargla, Algérie	Jour type calculé par la méthode FFT	Climatisation	Sud Nord Est Ouest	6,7 6,0 7,3 7,3	40,500 32,094 45,125 44,817
Ozel, M [29]	Antalya, Turquie	le 15ème jour de chaque mois de la saison d'été	Climatisation	Sud Nord Est/Ouest	3,6 3,1 4,0	25,86 18,55 31,55
Ramin, H et al [33]	Téhéran, Iran	21 Juillet pour l'été et le 21 Janvier pour l'hiver	Climatisation et chauffage	Sud Nord Est Ouest	3,06 1,68 3,37 3,37	9,81 11,20 12,35 12,35
E. Wati et al [109]	Douala, Cameroun	le 15ème jour de chaque mois	Climatisation et chauffage	Sud Nord Est/Ouest	11,0 10,4 11,1	99,37 88,38 101,29
M. Dlimi et al [110]	Meknès, Maroc	le 15ème jour de chaque mois (de Juin à Septembre)	Climatisation	Sud Nord Est Ouest	4 2 4 4	6,6251 1,7205 10,2275 9,7949

IV.8. Conclusion :

D'après les résultats obtenus, à travers les différentes parties de ce chapitre, on peut citer les conclusions suivantes :

- Les résultats obtenus par l'utilisation des données météorologiques réelles, comme condition aux limites, consomment beaucoup de temps de calcul.
- Les résultats obtenus par le cas réel, montrent l'importance de l'isolation thermique des bâtiments, qui implique une réduction considérable de la consommation d'énergie.
- L'utilisation d'une approche de condition périodique, minimise considérablement le temps de calcul, mais ne donne pas des résultats assez précis.
- L'utilisation d'une approche de condition périodique, nécessite un traitement spécifique des conditions initiales, pour pouvoir éliminer la diffusion numérique des erreurs.
- Les résultats obtenus par l'utilisation du 15 Juillet, comme jour typique, sont plus précis que ceux obtenus par le choix du 21 Juillet. Cette remarque reste valable pour les trois régions étudiées (Ouargla, Adrar et Bechar) ; cependant, cela reste à confirmer pour d'autres régions dans le monde.
- La précision des résultats, acquise par l'approche d'une condition périodique (soit le 15 ou le 21 Juillet), varie d'une orientation à une autre, pour la même région. Elle varie également, d'une région à une autre.
- L'utilisation de l'algorithme FFT pour calculer un jour typique, a amélioré considérablement la précision des résultats.
- L'utilisation de l'algorithme FFT donne toujours des résultats précis, quelle que soit la région étudiée, et pour n'importe quelle orientation.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'installation d'une isolation thermique sur l'enveloppe des bâtiments fait partie des solutions les plus simples et les plus efficaces, pour réduire la partie d'énergie consommée pour avoir un certain confort thermique. Le calcul des charges de climatisation et de chauffage, ainsi que le calcul de l'épaisseur optimale de l'isolant, peuvent être effectués par des méthodes simples et rapides (méthodes degrés-jours ou degrés-heures) ou des méthodes plus complexes mais beaucoup plus précises (méthode dynamique thermique).

Toutes les recherches antérieures, calculant l'épaisseur optimale d'isolation par la méthode dynamique, ont utilisé des conditions aux limites périodiques, c.à.d. simulé un seul jour typique au lieu de trouver une solution pour une longue période, qui peut s'étendre jusqu'à une année. Cette approche peut diminuer la précision du calcul, surtout si on sait qu'il y a une diversité de choix du jour typique et que la diffusion des erreurs numériques due aux conditions initiales, peut-être, male traitée ou même parfois négligée.

Dans cette étude, la précision du calcul de l'épaisseur optimale de l'isolant pour différentes orientations des murs des bâtiments est améliorée par l'utilisation des données météorologiques réelles de toute la période étudiée. D'autre part, l'influence du choix du jour typique (conditions périodique) ainsi que l'influence des conditions initiales sur la précision des résultats sont aussi étudiées.

Un code de calcul, en langage Fortran, a été réalisé afin de calculer les charges de climatisation, d'un mur multicouches unidimensionnel, en utilisant une méthode implicite des différences finies. Les charges thermiques obtenues sont utilisées ensuite pour calculer : l'épaisseur optimale de l'isolation, les économies d'énergie et le délai de récupération (Payback) pour chaque orientation.

En premier temps, l'utilisation des conditions météorologiques réelles, heure par heure, durant toute la période étudiée (6 mois dans notre cas) à nécessiter un temps de calcul énorme, dans les environs de 180 heures de simulation pour pouvoir trouver l'épaisseur optimale d'isolation des quatre orientations. Ce temps de calcul est dû au grand nombre de nœuds calculés (en moyenne : $4416 \text{ heure} \times (240 + 390)/2$ nœuds suivant x), et à la répétition du calcul pour chaque pas d'épaisseur (151 épaisseurs étudiés). Les résultats acquis par cette méthode ont

montré l'importance de l'isolation thermique pour la région de Ouargla. Le coût de l'énergie électrique consommée par la climatisation est réduit jusqu'à 1,73 \$/m² par ans, ce qui implique, un coût total cotisé durant la durée de vie du bâtiment (30 ans) de 45,33 \$/m². Une réduction importante des charges de refroidissement jusqu'à 82,16% et un Payback de 5,7466 années pour l'orientation Est est aussi remarqué. On a constaté aussi, que l'épaisseur optimale de l'isolation varie selon l'orientation des murs et que les orientations Est et Ouest nécessitent plus d'isolation que les orientations Nord et Sud. On a conclu que les épaisseurs optimales de l'isolation pour les quatre orientations Est, Nord, Ouest, Sud sont respectivement 0.073, 0.062, 0.073, 0.067m.

Dans un deuxième temps, les résultats trouvés par l'utilisation des conditions météorologiques réelles, sont utilisés pour étudier la précision des résultats obtenu par l'approche de choisir entre le 15 ou le 21 juillet, comme jour typique. L'influence des conditions initiales sur les résultats finales de la simulation numérique de notre problème, est aussi étudiée. D'après nos résultats, on a pu constater que l'application de la condition périodique, à l'extérieur du mur multicouche, une seule fois ne donne pas de bons résultats. De ce fait, cette condition doit être répétée jusqu'à ce que les résultats obtenus soient indépendants des conditions initiales. En prenant l'orientation Est comme exemple, on a trouvé une différence des charges de climatisation allant jusqu'à 76,2% pour le 15 juillet et 76.31% pour le 21 juillet, pour un jour type répété (effets des conditions initiales éliminés) et un autre non répété (effets des conditions initiales non éliminés). On a remarqué, qu'en prenant le 15 Juillet comme jour type répété, on s'approche du cas réel avec une différence maximale des charges de climatisation de 13,23% pour une épaisseur d'isolation de 0,15 m et de 13,07% pour un mur sans isolation. Cette différence relative, change d'une région à une autre, elle atteint jusqu'à 37,22% et 14,75% pour un mur non isolé orienté vers l'Est pour la région de Bechar et Adrar respectivement. Le temps de calcul se réduit considérablement, il est minimisé jusqu'à 90.8% pour les deux cas du 15 et 21 Juillet avec répétition.

L'imprécision des résultats obtenues par l'utilisation d'une condition périodique (le cas du 15 ou du 21 Juillet comme jour type), en plus des changements du degré de la précision des résultats selon l'orientation des murs et selon la région étudiée, nous a mené à proposer une méthode plus fiable et plus précise, dans laquelle le jour typique sera calculé en se basant sur les données climatiques de toute la période étudiée, et cela par l'utilisation de l'algorithme FFT.

Les résultats des charges de climatisation d'un mur sans isolation, obtenus par cette approche, représentent une différence maximale des quatre orientations de 0,83% pour la région de Ouargla, et une différence maximale de 0.88% pour les trois régions étudiées : Ouargla, Adrar et Bechar. Le temps de calcul est réduit par cette méthode de 45,505 heures jusqu'à 4,212 heures seulement. Le taux de réduction relative du temps de calcul est de 90,74% pour chaque orientation. La grande précision des résultats obtenus par l'approche FFT qui reste presque constante pour les trois régions étudiées, quel que soit l'orientations des murs, ainsi que le temps de calcul, considérablement réduit par rapport au cas réel, montrent l'efficacité de cette méthode pour le calcul des épaisseurs optimales d'isolation.

Au meilleur de nos connaissances, cette étude est la première à calculer les charges de refroidissement en utilisant les conditions météorologiques réelles, à évaluer l'effet de choisir entre le 15 et le 21 juillet comme un jour typique sur la précision des résultats. En outre, on peut dire aussi que c'est la première étude qui a proposé d'utiliser l'algorithme FFT pour calculer le jour typique au lieu d'imposer directement les conditions météorologiques du 15 ou du 21 juillet comme conditions périodique.

Perspectives et recommandations :

Les résultats encourageants des coûts cotisés, après l'installation de l'isolation thermique, ouvrent de nombreuses perspectives telles que :

- L'étude de l'efficacité thermique de nombreux matériaux locaux, utilisés comme isolant, pour minimiser le coût dû à l'isolation et par conséquent, diminuer le coût de l'énergie consommée par la climatisation ;
- L'étude de l'effet de double vitrage des fenêtres des bâtiments sur les charges de climatisation, en plus des dimensions convenables des portes et des fenêtres, pour chaque région en Algérie, et son effet sur le calcul de l'épaisseur optimale d'isolation.
- Le choix du type d'isolant convenable, ainsi que le calcul de l'épaisseur optimale d'isolation pour chaque zone climatique en Algérie.

A la fin de cette conclusion on recommande ce qui suit :

- D'après notre recherche, dans laquelle on a prouvé que le mauvais choix de la condition périodique (jour typique) a des conséquences direct sur la précision des résultats, on peut dire que les conclusions, des études précédentes, qui ont confirmées que les résultats des méthodes degrés-jours et degrés-heures sont imprécises, doivent être réétudiées. Ces conclusions sont basées sur la comparaison des résultats de la méthode degrés-temps avec d'autres obtenus par la méthode dynamique avec une condition périodique, par contre, il faut que la comparaison soit effectuée avec une méthode dynamique utilisant des données météorologiques réelles (DMR).

- Vu l'influence de l'isolation thermique sur la réduction importante de la facture de l'énergie consommée par la climatisation dans le grand sud Algérien, on recommande fortement le développement d'un code de construction, dans lequel l'isolation thermique sera obligatoire.

- Enfin, on recommande l'algorithme FFT pour le calcul du jour typique pour tous les simulations des problèmes, où des jours représentatifs sont à utilisés en tant que conditions aux limites périodique. On peut citer par exemple : la simulation des cheminées solaire, des capteurs solaires, séchage passif, panneaux photovoltaïque thermique, etc.

Références bibliographiques

- [1] S. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M. Cherier, M. Yaiche, and N. Benamrane, "Diagnosis and comprehensive quantification of energy needs for existing residential buildings under Sahara weather conditions," *Advances in Building Energy Research*, vol. 11, no. 1, pp. 37-51, 2017.
- [2] V. Bianco, F. Scarpa, and L. A. Tagliafico, "Estimation of primary energy savings by using heat pumps for heating purposes in the residential sector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 938-947, 2017.
- [3] H. Lin, Q. Wang, Y. Wang, Y. Liu, Q. Sun, and R. Wennersten, "The energy-saving potential of an office under different pricing mechanisms—Application of an agent-based model," *Applied Energy*, vol. 202, pp. 248-258, 2017.
- [4] H. S. Park, M. Lee, H. Kang, T. Hong, and J. Jeong, "Development of a new energy benchmark for improving the operational rating system of office buildings using various data-mining techniques," *Applied energy*, vol. 173, pp. 225-237, 2016.
- [5] T. Pekdogan and T. Basaran, "Thermal performance of different exterior wall structures based on wall orientation," *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 15-24, 2017.
- [6] Z. Wang, L. Wang, A. Ma, K. Liang, Z. Song, and L. Feng, "Performance evaluation of ground water-source heat pump system with a fresh air pre-conditioner using ground water," *Energy conversion and management*, vol. 188, pp. 250-261, 2019.
- [7] O. Rejeb, H. Dhaou, and A. Jemni, "A numerical investigation of a photovoltaic thermal (PV/T) collector," *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 43-50, 2015.
- [8] M. Hissouf, M. Najim, and A. Charef, "Numerical study of a covered Photovoltaic-Thermal Collector (PVT) enhancement using nanofluids," *Solar Energy*, vol. 199, pp. 115-127, 2020.
- [9] E. M. Mokheimer, Y. N. Dabwan, and M. A. Habib, "Optimal integration of solar energy with fossil fuel gas turbine cogeneration plants using three different CSP technologies in Saudi Arabia," *Applied energy*, vol. 185, pp. 1268-1280, 2017.

- [10] E. M. Mokheimer, Y. N. Dabwan, M. A. Habib, S. A. Said, and F. A. Al-Sulaiman, "Techno-economic performance analysis of parabolic trough collector in Dhahran, Saudi Arabia," *Energy conversion and management*, vol. 86, pp. 622-633, 2014.
- [11] N. B. Hassine, X. Chesneau, and A. Laatar, "Modelisation and Simulation of Heat and Mass Transfers during Solar Drying of Sewage Sludge with Introduction of Real Climatic Conditions," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 10, no. 2, pp. 651-659, 2017.
- [12] Y. Xu and X. Zhou, "On-line power management for grid-connected solar chimney power plants with various heat storages," *Energy Conversion and Management*, vol. 187, pp. 167-175, 2019.
- [13] H. Semai, A. Bouhdjar, and S. Larbi, "Canopy slope effect on the performance of the solar chimney power plant," *International Journal of Green Energy*, vol. 14, no. 3, pp. 229-238, 2017.
- [14] M. S. Hakim, "Recherche d'une configuration optimale d'une centrale solaire à cheminée," Thèse de Doctorat en Sciences, Spécialité : Physique Energétique, Université Abou-Bekr Belkaid-Faculté Des Sciences – Département De Physique - Tlemcen, 2017.
- [15] I. Zavala-Guillén *et al.*, "Ventilation potential of an absorber-partitioned air channel solar chimney for diurnal use under Mexican climate conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 807-821, 2019.
- [16] M. Hosien and S. Selim, "Effects of the geometrical and operational parameters and alternative outer cover materials on the performance of solar chimney used for natural ventilation," *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 355-367, 2017.
- [17] N. Daouas, "A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads," *Applied Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 156-164, 2011.
- [18] N. Daouas, Z. Hassen, and H. B. Aissia, "Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia," *Applied thermal engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 319-326, 2010.

- [19] Sonelgaz. (2019, Consulté le 10 février 2020). *14 343 MW : Nouveau Record Historique De Consommation Électrique*. Available: <https://www.sonelgaz.dz/2307/14-343-mw-nouveau-record-historique-de-consommation-electrique-4>
- [20] S. Mirrahimi, M. F. Mohamed, L. C. Haw, N. L. N. Ibrahim, W. F. M. Yusoff, and A. Aflaki, "The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 1508-1519, 2016.
- [21] J. Yu, C. Yang, L. Tian, and D. Liao, "A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China," *applied energy*, vol. 86, no. 11, pp. 2520-2529, 2009.
- [22] B. B. Ekici, A. A. Gulden, and U. T. Aksoy, "A study on the optimum insulation thicknesses of various types of external walls with respect to different materials, fuels and climate zones in Turkey," *Applied Energy*, vol. 92, pp. 211-217, 2012.
- [23] L. Derradji, K. Imessad, M. Amara, and F. B. Errebai, "A study on residential energy requirement and the effect of the glazing on the optimum insulation thickness," *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 975-985, 2017.
- [24] F. F. C. Vincelas, T. Ghislain, and T. Robert, "Influence of the types of fuel and building material on energy savings into building in tropical region of Cameroon," *Applied Thermal Engineering*, vol. 122, pp. 806-819, 2017.
- [25] M. F. Alsayed and R. A. Tayeh, "Life cycle cost analysis for determining optimal insulation thickness in Palestinian buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 22, pp. 101-112, 2019.
- [26] A. Bolattürk, "Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey," *Building and environment*, vol. 43, no. 6, pp. 1055-1064, 2008.
- [27] J. Yu, L. Tian, C. Yang, X. Xu, and J. Wang, "Optimum insulation thickness of residential roof with respect to solar-air degree-hours in hot summer and cold winter zone of china," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 9, pp. 2304-2313, 2011.
- [28] M. Kayfeci, A. Keçebaş, and E. Gedik, "Determination of optimum insulation thickness of external walls with two different methods in cooling applications," *Applied thermal engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 217-224, 2013.

- [29] M. Ozel, "Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate," *Energy Conversion and Management*, vol. 66, pp. 106-114, 2013.
- [30] S. A. Al-Sanea, M. Zedan, A. Al-Mujahid, and Z. Al-Suhaibani, "Optimum R-values of building walls under different climatic conditions in the Kingdom of Saudi Arabia," *Applied Thermal Engineering*, vol. 96, pp. 92-106, 2016.
- [31] M. Ozel and K. Pihili, "Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations," *building and environment*, vol. 42, no. 8, pp. 3051-3059, 2007.
- [32] N. Daouas, "Impact of external longwave radiation on optimum insulation thickness in Tunisian building roofs based on a dynamic analytical model," *Applied energy*, vol. 177, pp. 136-148, 2016.
- [33] H. Ramin, P. Hanafizadeh, and M. A. Akhavan-Behabadi, "Determination of optimum insulation thickness in different wall orientations and locations in Iran," *Advances in Building Energy Research*, vol. 10, no. 2, pp. 149-171, 2016.
- [34] M. Ozel, "Influence of glazing area on optimum thickness of insulation for different wall orientations," *Applied Thermal Engineering*, vol. 147, pp. 770-780, 2019.
- [35] M. Ozel, "Effect of indoor design temperature on the heating and cooling transmission loads," *Journal of Building Engineering*, vol. 7, pp. 46-52, 2016.
- [36] M. Ozel, "Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness," *Energy and Buildings*, vol. 72, pp. 288-295, 2014.
- [37] M. Ozel, "Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials," *Energy and Buildings*, vol. 49, pp. 552-559, 2012.
- [38] M. Ozel, "The influence of exterior surface solar absorptivity on thermal characteristics and optimum insulation thickness," *Renewable energy*, vol. 39, no. 1, pp. 347-355, 2012.
- [39] M. Ozel, "Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method," *Applied Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2429-2435, 2011.
- [40] M. Ozel, "Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 17-18, pp. 3854-3863, 2011.

- [41] M. Ozel, "Thermal, economical and environmental analysis of insulated building walls in a cold climate," *Energy conversion and management*, vol. 76, pp. 674-684, 2013.
- [42] S. A. Al-Sanea, M. Zedan, and S. A. Al-Ajlan, "Effect of electricity tariff on the optimum insulation-thickness in building walls as determined by a dynamic heat-transfer model," *Applied Energy*, vol. 82, no. 4, pp. 313-330, 2005.
- [43] S. A. Al-Sanea, "Evaluation of heat transfer characteristics of building wall elements," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 12, no. 2, pp. 285-312, 2000.
- [44] S. Al-Sanea and M. Zedan, "Effect of insulation location on thermal performance of building walls under steady periodic conditions," *International journal of ambient energy*, vol. 22, no. 2, pp. 59-72, 2001.
- [45] S. A. Al-Sanea, "Finite-volume thermal analysis of building roofs under two-dimensional periodic conditions," *Building and environment*, vol. 38, no. 8, pp. 1039-1049, 2003.
- [46] S. A. Al-Sanea, M. Zedan, S. A. Al-Ajlan, and A. S. Abdul Hadi, "Heat transfer characteristics and optimum insulation thickness for cavity walls," *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 26, no. 3, pp. 285-307, 2003.
- [47] S. A. Al-Sanea and M. Zedan, "Effect of insulation location on initial transient thermal response of building walls," *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 24, no. 4, pp. 275-300, 2001.
- [48] S. A. Al-Sanea, "Thermal performance of building roof elements," *Building and Environment*, vol. 37, no. 7, pp. 665-675, 2002.
- [49] S. A. Al-Sanea and M. Zedan, "Optimized monthly-fixed thermostat-setting scheme for maximum energy-savings and thermal comfort in air-conditioned spaces," *Applied Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 326-346, 2008.
- [50] S. Al-Sanea and M. Zedan, "Optimum insulation thickness for building walls in a hot-dry climate," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 23, no. 3, pp. 115-126, 2002.
- [51] S. Al-Sanea and M. Zedan, "Heat transfer characteristics and optimum insulation thickness for Hordi roofs using a pseudo one-dimensional dynamic model," *International journal of ambient energy*, vol. 27, no. 2, pp. 85-98, 2006.

- [52] S. A. Al-Sanea and M. Zedan, "Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass," *Applied Energy*, vol. 88, no. 9, pp. 3113-3124, 2011.
- [53] S. A. Al-Sanea and M. Zedan, "Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions," *Applied Energy*, vol. 98, pp. 584-593, 2012.
- [54] S. A. Al-Sanea, M. Zedan, and S. Al-Hussain, "Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential," *Applied Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 430-442, 2012.
- [55] S. A. Al-Sanea, M. Zedan, and S. Al-Hussain, "Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls," *Applied energy*, vol. 102, pp. 1063-1070, 2013.
- [56] Ministère De L'habitat De L'Urbanisme Et De La Ville. (2019, Consulté le 10 février 2020). *Les statistiques*. Available: <http://www.mhuv.gov.dz/Pages/Statistiques.aspx>.
- [57] S. Said, M. Habib, and M. Iqbal, "Database for building energy prediction in Saudi Arabia," *Energy conversion and management*, vol. 44, no. 1, pp. 191-201, 2003.
- [58] K. T. Papakostas, A. M. Papadopoulos, and I. G. Vlahakis, "Optimisation of thermal protection in residential buildings using the variable base degree-days method," *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 24, no. 1, pp. 19-31, 2005.
- [59] B. M. Ziapour, M. Rahimi, and M. Yousefi, "Thermoeconomic analysis for determining optimal insulation thickness for new composite prefabricated wall block as an external wall member in buildings," *Journal of Building Engineering*, p. 101354, 2020.
- [60] M. A. Kallioğlu, U. Ercan, A. S. Avcı, C. Fidan, and H. Karakaya, "Empirical modeling between degree days and optimum insulation thickness for external wall," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 42, no. 11, pp. 1314-1334, 2020.
- [61] H. Huang *et al.*, "Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical climate," *Sustainable Cities and Society*, vol. 52, p. 101840, 2020.

- [62] A. Ucar and F. Balo, "Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey," *Applied Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 730-736, 2009.
- [63] Y. Wang, Z. Huang, and L. Heng, "Cost-effectiveness assessment of insulated exterior walls of residential buildings in cold climate," *International Journal of Project Management*, vol. 25, no. 2, pp. 143-149, 2007.
- [64] Ö. A. Dombaycı, M. Gölcü, and Y. Pancar, "Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources," *Applied Energy*, vol. 83, no. 9, pp. 921-928, 2006.
- [65] K. Çomaklı and B. Yüksel, "Environmental impact of thermal insulation thickness in buildings," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 5-6, pp. 933-940, 2004.
- [66] A. Hasan, "Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost," *Applied energy*, vol. 63, no. 2, pp. 115-124, 1999.
- [67] M. Boujnah, K. Jraida, and I. Mounir, "Determination of Optimal Roof Insulation Thickness in Residential Building in Marrakech," in *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2017, pp. 1-4: IEEE.
- [68] K. Papakostas and N. Kyriakis, "Heating and cooling degree-hours for Athens and Thessaloniki, Greece," *Renewable Energy*, vol. 30, no. 12, pp. 1873-1880, 2005.
- [69] V. Badescu and E. Zamfir, "Degree-days, degree-hours and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures (Romania)," *Energy conversion and management*, vol. 40, no. 8, pp. 885-900, 1999.
- [70] P. A. Fokaides and A. M. Papadopoulos, "Cost-optimal insulation thickness in dry and mesothermal climates: Existing models and their improvement," *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 203-212, 2014.
- [71] Y. Wang, B. Li, and W. Zheng, "Optimum insulation thickness for the sandwich structure livestock buildings external envelopes in different climate regions of China," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 29-41, 2020.
- [72] A. S. Canbolat, A. H. Bademlioglu, and O. Kaynakli, "Determination of proper insulation thickness for building walls regarding economic consideration," *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, vol. 3, pp. 173-176, 2018.

- [73] Ö. KAYNAKLI and F. KAYNAKLI, "Determination of Optimum Thermal Insulation Thicknesses for External Walls Considering the Heating, Cooling and Annual Energy Requirement," *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 227-242, 2016.
- [74] C. Mulhall and R. Aynsley, "Solar absorptance and uninsulated houses in the humid tropics," in *Conference On Passive And Low Energy Architecture*, 1999, vol. 16.
- [75] P. O'Callaghan and S. Probert, "Sol-air temperature," *Applied Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 307-311, 1977.
- [76] T. H. Kuehn, J. W. Ramsey, and J. L. Threlkeld, *Thermal environmental engineering*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 1998.
- [77] A. Handbook-Fundamentals, "American society of Heating," *Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 2009.
- [78] E. K. M. Abdelgadir, A. M. H. Adam, O. Younis, and A. K. Hussein, "Optimum Thermal Insulation Thickness for Building Under Different Climate Regions-A Review," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 59, pp. 254-268, 2019.
- [79] O. Kaynakli, "A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 415-425, 2012.
- [80] Y. A. Cengel, S. Klein, and W. Beckman, *Heat transfer: a practical approach*. WBC McGraw-Hill Boston, 1998.
- [81] N. Aydin and A. Biyikoğlu, "Determination of Optimum Insulation Thickness by Life-Cycle Cost Analysis for Residential Buildings in Turkey," *Science and Technology for the Built Environment*, no. just-accepted, pp. 1-19, 2020.
- [82] D. Kumar, P. X. Zou, R. A. Memon, M. M. Alam, J. G. Sanjayan, and S. Kumar, "Life-cycle cost analysis of building wall and insulation materials," *Journal of Building Physics*, vol. 43, no. 5, pp. 428-455, 2020.
- [83] V. Annibaldi, F. Cucchiella, P. De Berardinis, M. Rotilio, and V. Stornelli, "Environmental and economic benefits of optimal insulation thickness: A life-cycle cost analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 116, p. 109441, 2019.

- [84] M. Ashouri, F. R. Astarai, R. Ghasempour, M. H. Ahmadi, and M. Feidt, "Optimum insulation thickness determination of a building wall using exergetic life cycle assessment," *Applied Thermal Engineering*, vol. 106, pp. 307-315, 2016.
- [85] K. Saafi and N. Daouas, "A life-cycle cost analysis for an optimum combination of cool coating and thermal insulation of residential building roofs in Tunisia," *Energy*, vol. 152, pp. 925-938, 2018.
- [86] N. Ghrab-Morcos, "Energy and financial considerations related to wall design for a conditioned cell in Tunisian conditions," *Renewable energy*, vol. 1, no. 1, pp. 145-159, 1991.
- [87] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes., New York," *Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore*, 1991.
- [88] M. A. Ersöz and A. Yildiz, "Determination of economic optimum insulation thickness of indoor pipelines for different insulation materials in split air conditioning systems," *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. JTST0016-JTST0016, 2016.
- [89] T. Mahlia, B. Taufiq, and H. Masjuki, "Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall," *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 2, pp. 182-187, 2007.
- [90] M. Söylemez and M. Ünsal, "Optimum insulation thickness for refrigeration applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 40, no. 1, pp. 13-21, 1999.
- [91] M. N. Özişik, H. R. Orlande, M. J. Colaço, and R. M. Cotta, *Finite difference methods in heat transfer*. CRC press, 2017.
- [92] E. E. Kalu, *Numerical Methods with Applications: Abridged*. Lulu. com, 2009.
- [93] J. Virgone and J. Noel, "ARCHICUBE et CODYMUR, logiciels de simulation des ponts thermiques et du comportement thermique d'une paroi en régime variable," *Congrès CIFQ 2003*, 2003.
- [94] F. Kuznik, J. Virgone, and J. Noel, "Optimization of a phase change material wallboard for building use," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 11-12, pp. 1291-1298, 2008.
- [95] CodyMur. (Consulté le 07 Avril 2017). Available: <http://www.jnlog.com/codymur1.htm>

- [96] Y. Jiang, "Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China," *Applied energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1458-1464, 2009.
- [97] R. Yumrutaş, M. Ünsal, and M. Kanoğlu, "Periodic solution of transient heat flow through multilayer walls and flat roofs by complex finite Fourier transform technique," *Building and Environment*, vol. 40, no. 8, pp. 1117-1125, 2005.
- [98] Ö. Kaşka and R. Yumrutaş, "Comparison of experimental and theoretical results for the transient heat flow through multilayer walls and flat roofs," *Energy*, vol. 33, no. 12, pp. 1816-1823, 2008.
- [99] Ö. Kaşka, R. Yumrutaş, and O. Arpa, "Theoretical and experimental investigation of total equivalent temperature difference (TETD) values for building walls and flat roofs in Turkey," *Applied Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 737-747, 2009.
- [100] (Consulté le 26 Novembre 2016). *Générateur de Prix. Réhabilitation. Algérie* Available: http://www.algerie.prix-construction.info/renovation/Enveloppe_et_finition_exterieure/Isolation_exterieure/Murs_en_contact_avec_le_terrain/EIM010_Isolation_par_l_exterieur_des_murs__0_0_0_0_6.html
- [101] T. Economics. (Consulté le 26 Novembre 2016). *Algeria Inflation Rate*. Available: <http://www.tradingeconomics.com/algeria/inflation-cpi>
- [102] T. Economics. (Consulté le 26 Novembre 2016). *Algeria Discount Rate* Available: <https://tradingeconomics.com/algeria/interest-rate>
- [103] J. Remund *et al.*, "Meteonorm handbook part I: software," *Version 7.1*, vol. 7, pp. 1-55, 2014.
- [104] Wikipédia. (Consulté le 20 Août 2020). *Transformation de Fourier rapide*. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformation_de_Fourier_rapide
- [105] H. Garnier, P. Nancy, Ed. *Décomposition en série de Fourier Signaux périodiques*. Université de Lorraine.
- [106] A. Fluent, "Ansys fluent theory guide," *ANSYS Inc., USA*, vol. 15317, pp. 724-746, 2011.
- [107] H. Necib and B. Necib, "Improve the calculation accuracy of the optimal insulation thickness in building walls as determined by a dynamic heat transfer model," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, pp. 903-913, 2020.

- [108] M. Dlimi, O. Iken, R. Agounoun, I. Kadiri, and K. Sbai, "Dynamic assessment of the thermal performance of hemp wool insulated external building walls according to the Moroccan climatic zoning," *Journal of Energy Storage*, vol. 26, p. 101007, 2019.
- [109] E. Wati, P. Meukam, and M. K. Nematchoua, "Influence of external shading on optimum insulation thickness of building walls in a tropical region," *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 754-762, 2015.
- [110] M. Dlimi, R. Agounoun, I. Kadiri, K. Sbai, and A. Rahmani, "Effect of the integration of hemp wool as an insulation material for the construction of the roof and external walls of a typical Moroccan building," *MS&E*, vol. 783, no. 1, p. 012013, 2020.

