

# Étude sur l'Optimisation de l'Épaisseur des Couches d'Aérosil et Amélioration par Cavité d'Air dans l'Isolation des Murs des Bâtiments au Contexte Climatique Marocain

M. Fellah<sup>1</sup>, S. Ouhaibi<sup>2</sup>, N. Belouaggadia<sup>1,3</sup>, K. Mansouri<sup>1</sup>, N. Sebaibi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire M2S2I, ENSET & Université Hassan II de Casablanca, Bd Hassan II, 28830 Mohammedia, Maroc.

<sup>2</sup> Laboratoire LISA, ENSA & Université de Fès, Av. Moulay Abdellah, Fès, Maroc.

<sup>3</sup> Builders Lab, Builders École d'ingénieurs, COMUE Normandie Université, 1 Rue Pierre et Marie Curie, 14610 Epron, France

**RESUME** Ces dernières années ont vu croître l'intérêt pour l'utilisation de matériaux biosourcés dans l'isolation thermique des bâtiments. L'intégration de ces matériaux dans l'enveloppe des constructions offre une double opportunité : réduire la consommation d'énergie et le taux d'émission de gaz à effet de serre. Cette étude se concentre sur l'évaluation de l'utilisation de ce nouveau matériau isolant pour les murs extérieurs des bâtiments dans les six zones climatiques Marocaine. En utilisant une approche basée sur l'analyse du coût du cycle de vie (LCCA), Cette étude vise à déterminer l'épaisseur optimale de l'Aérosil, les économies d'énergie potentielles et le délai de récupération du coût de l'isolation, sur une période d'analyse de 20 ans. En outre, une analyse comparative a été entreprise en utilisant une modélisation numérique bidimensionnelle de la dynamique des fluides (CFD) entre un mur isolé avec l'épaisseur optimale du matériau écologique uniquement et un mur comportant ce matériau en combinaison avec une lame d'air. Les résultats ainsi obtenus, révèlent que les épaisseurs d'isolation optimales les plus importantes sont observées dans la zone climatique d'Ifrane (7 cm), suivie par Fès, Errachidia et Marrakech (6 et 5 cm respectivement). De plus, une couche de vide d'air a été introduite dans le mur multicouche isolé optimal pour minimiser son épaisseur tout en stabilisant la température de la surface intérieure des murs.

**Mots-clefs** Epaisseur optimale de l'isolation, Analyse du coût du cycle de vie, simulation CFD, isolation thermique, charges de refroidissement et de chauffage

## I. INTRODUCTION

Alors que nous explorons davantage le domaine de la construction durable et des solutions novatrices en matière de bâtiment, il devient de plus en plus évident que le secteur du bâtiment joue un rôle important dans le paysage mondial de la consommation d'énergie et est un contributeur majeur aux émissions de gaz à effet de serre. Cette réalité est particulièrement marquée au Maroc, où le secteur du bâtiment représente 33 % de la consommation finale d'énergie du pays [1]. L'urgence de réduire cette consommation d'énergie et de mettre en place de

nouvelles normes d'efficacité énergétique a conduit à l'introduction récente de réglementations thermiques pour les bâtiments au Maroc. Ces réglementations promettent de réduire de manière significative les coûts énergétiques associés à ce secteur. Au Maroc, où l'influence du climat et des conditions météorologiques sur la consommation d'énergie est particulièrement marquée, l'architecture joue un rôle essentiel dans la performance énergétique et thermique des bâtiments. C'est dans ce contexte que l'intégration de techniques passives et de matériaux isolants dans les pratiques de construction est utilisée comme un moyen de réaliser des économies d'énergie significatives. Des chercheurs du monde entier s'efforcent de développer des solutions novatrices pour améliorer l'isolation thermique des bâtiments, avec pour objectif de promouvoir la durabilité et l'efficacité énergétique dans les projets de construction. Dans notre quête pour améliorer l'efficacité thermique des enveloppes des bâtiments et réaliser des économies d'énergie plus substantielles, les approches de construction innovantes intègrent désormais des couches d'air internes dans l'enveloppe du bâtiment. Alvaro De Gracia et Coll. [2] Ont présenté les différentes typologies de modélisation numérique (CFD) dans l'utilisation de façades double peau (FDC) dans le secteur du bâtiment, ainsi que leurs avantages thermiques. Wilmer Pasut et Coll. [3] Ont démontré, par le biais d'une analyse de sensibilité, une stratégie efficace pour mener une simulation CFD de l'enveloppe d'un bâtiment spécifique. Ils ont conclu que, dans le cas d'une façade double peau caractérisée par un écoulement bidirectionnel prédominant, l'effort supplémentaire requis pour élaborer un modèle 3D n'est pas justifié par une amélioration significative des résultats. Omar Iken et Coll. [4] Ont illustré, à l'aide d'une simulation numérique par la méthode bidimensionnelle de dynamique des fluides numérique (CFD), qu'une configuration intelligente d'une façade double peau peut contrôler la génération de l'effet de serre. Leur étude a porté sur le comportement thermique et énergétique de cette façade en intégrant du dioxyde de vanadium (VO<sub>2</sub>) dopé au tungstène (W) en tant que matériau mince optiquement intelligent, ainsi qu'un revêtement en nitrure d'aluminium (AlN) à forte capacité d'absorption. Naouel Daouas et Coll. [5] Ont mis en évidence, à travers une analyse du coût du cycle de vie sur une période de 30 ans, que l'orientation sud est la plus économique. Ils ont déterminé qu'une épaisseur d'isolation optimale de 10,1 cm permettrait d'atteindre 71,33 % d'économies d'énergie, avec une période de récupération de l'investissement estimée à 3,29 ans. Meral Ozel et Coll. [6] Ont identifié, dans cette étude, les épaisseurs optimales d'isolation pour toutes les orientations des murs, à travers une analyse des coûts sur une durée de vie de 20 ans du bâtiment. Ils ont conclu que, pour la saison de refroidissement, l'épaisseur d'isolation optimale la plus basse est observée pour le mur orienté vers le nord, caractérisé par une charge de refroidissement minimale. À l'inverse, les murs orientés vers l'est et l'ouest, supportant une charge de refroidissement maximale, nécessitent une épaisseur d'isolation plus élevée.

Notre étude vise à déterminer l'épaisseur optimale d'un isolant thermique écologique dans les six zones climatiques distinctes du Maroc. L'objectif principal est de réduire la consommation d'énergie durant les étés chauds et les hivers froids en déterminant l'épaisseur optimale de l'isolant écologique utilisé. Cette approche repose sur une analyse approfondie basée sur le concept de degré-jour et inclut une évaluation du coût du cycle de vie. De plus, nous avons utilisé la modélisation numérique bidimensionnelle en mécanique des fluides, également connue sous le nom de dynamique des fluides numérique (CFD), pour évaluer l'efficacité de notre solution novatrice de lame d'air, afin de maintenir la stabilité de la température de la surface intérieure du mur. Cette méthodologie nous a permis de déterminer avec précision l'épaisseur optimale de l'isolant, une étape essentielle pour améliorer l'efficacité énergétique dans la conception des bâtiments.

## II. CHOIX DU MATÉRIAU COMPOSITE

Dans le cadre de leurs travaux de recherche, Ouhaibi et Coll. [7] ont étudié le matériau composite en combinant l'Aérosil et du plâtres. Des revêtements hydrophobes variés, contenant de la poudre « AEROSIL A200 » (à des concentrations allant de 5 à 15% en poids) et du gypse, ont été formulés pour cette analyse. Le gypse commercial, utilisé dans cette étude, provient des carrières de la région de Safi situées dans le sud-est du Maroc et la poudre de fumée de silice hydrophile (AEROSIL A200) est fourni par la société « Evonik Operation Gmbu ». L'analyse texturale, réalisée par la théorie de Brunauer-Emmett-Teller BET [8], a révélé une surface spécifique de  $200\text{m}^2/\text{g}$  pour la poudre d'Aérosil, avec une taille de particules de l'ordre de 12 nm, conférant ainsi une surface spécifique importante. Le Tableau 1 reprend les résultats présentés par Ouhaibi et Coll. Où la composition S10 a été déterminée comme étant la plus optimale en termes de caractérisation thermophysiques.

**TABLEAU 1.** Propriétés thermophysiques du composite sélectionné [7]

Matériaux	Conductivité thermique ( $W/m.K$ )	Densité ( $kg/m^3$ )	Chaleur spécifique ( $J/kg.K$ )
S0	$0,247 \pm 0,002$	$1210,9 \pm 0,07$	$1102,0 \pm 0,05$
S5	$0,148 \pm 0,001$	$890,6 \pm 0,07$	$1265,6 \pm 0,05$
S10	$0,043 \pm 0,005$	$679,6 \pm 0,07$	$1490,4 \pm 0,05$
S15	$0,040 \pm 0,003$	$656,2 \pm 0,07$	$1437,8 \pm 0,05$

## III. DEMARCHE DE TRAVAIL

Dans cette section, nous exposons notre méthodologie de recherche, initiée par la cartographie détaillée des zones d'étude et l'évaluation des charges thermiques pour le chauffage et le refroidissement. Nous abordons ensuite la sélection des différentes configurations murales à étudier. En prenant en compte le coût du cycle de vie (LCC) en ( $\$/m^2$ ), nous visons à déterminer l'épaisseur optimale de l'isolant. Enfin, nous présentons notre modèle de simulation numérique développé pour évaluer l'amélioration de la performance thermique, se traduisant par un confort thermique accru, pour les deux configurations de murs analysées.

### A. Données météorologiques

Dans cette étude, conformément au Règlement thermique de construction au Maroc [9], nous avons exploité les données météorologiques provenant des stations de surveillance réparties à travers le pays sur une décennie. La classification de ces zones climatiques repose principalement sur l'accumulation des degrés-jours en hiver et en été. La cartographie obtenue permet de distinguer nettement six zones climatiques distinctes, chacune étant associée aux villes suivantes.

**TABLEAU 2.** Description des conditions climatiques étudiées [9]

Zones climatiques	Villes	Type de climat	Caractéristiques climatiques
1	Agadir	Océanique	Hivers doux et humides & étés tempérés par l'océan
2	Tanger	Méditerranéen	Hiver doux et pluvieux & Etés chauds et secs
3	Fès	Semi-aride	Hivers froids avec gelées fréquentes & Etés très chauds et secs
4	Ifrane	Montagne	Hivers froids et enneigés & étés doux
5	Marrakech	Semi-aride	Hivers doux & étés très chauds et secs
6	Errachidia	Aride	Hivers frais & étés torrides

*B. Procédure de calcul des charges de chauffage et de refroidissement*

Nous considérons que les pertes de chaleur se limitent aux surfaces des murs extérieurs. Les besoins annuels en chauffage ( $Q_h$ ) et en refroidissement ( $Q_c$ ) en ( $J/m^2$ ), peuvent alors être évalués en utilisant le concept de degrés-jours, comme décrit dans les équations (1) et (2) [10].

$$Q_h = 24 \times 3600 \times DD_h \times U \quad (1)$$

$$Q_c = 24 \times 3600 \times DD_c \times U \quad (2)$$

Où ( $DD_h$ ) et ( $DD_c$ ) représentent le nombre de degrés-jours pour les besoins de chauffage et de refroidissement respectivement. Le coefficient  $U$  en ( $W/m^2.K$ ) exprime la transmission thermique globale à travers la paroi. Il est calculé à l'aide de (3) :

$$U = 1 / (R_{wt} + e_{ins} / K_{ins}) \quad (3)$$

Où  $R_{wt}$  en ( $m^2.K/W$ ) représente la résistance thermique de la paroi entière sans matériau isolant, et  $K_{ins}$  et  $e_{ins}$  sont, respectivement, la conductivité thermique et l'épaisseur du matériau isolant.

**TABLEAU 3.**  $DD_h$  et  $DD_c$  des villes sélectionnées [11]

Villes	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	$DD_h$ (°C-jour)	$DD_c$ (°C-jour)
Agadir	30,4	-9,6	23	619	549
Tanger	35,7	-5,8	85	830	441
Fès	33,9	-5,0	579	1295	712
Ifrane	33,5	-5,2	1665	1901	517
Marrakech	31,6	-8,0	466	754	1042
Errachidia	31,9	-4,4	1045	1034	1407

### C. La configuration étudiée

Les constructions au Maroc sont généralement dotées d'une enveloppe composée de briques et de mortier de ciment. Cette étude évalue l'amélioration de la performance thermique des murs extérieurs en intégrant de l'aérosil et mesure son impact sur les besoins en chauffage et en climatisation. La configuration initiale du mur, représentée dans la "Fig. 1", comprend un mur composite avec 2 cm de mortier de ciment à l'intérieur et à l'extérieur, ainsi que 20 cm de briques pleines. La deuxième configuration, également présentée dans la "Fig. 1", est similaire mais intègre une couche isolante de 2 cm d'aérosil. Les propriétés thermiques des matériaux utilisés sont récapitulées dans le tableau 4 [12].

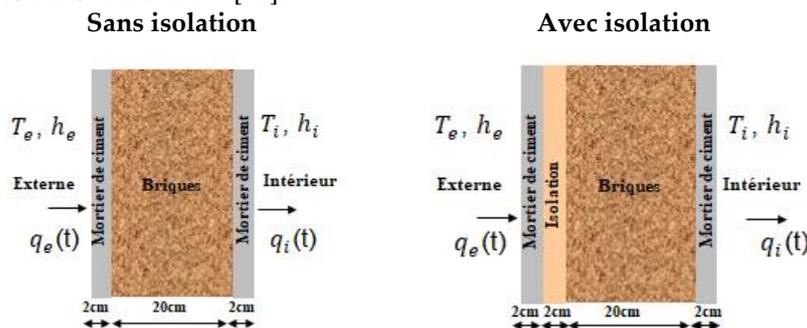


FIGURE 1. Configuration du mur étudié

TABLEAU 4. Matériaux de construction et leurs propriétés thermophysiques

Matériaux	Conductivité thermique ( $W / m.K$ )	Densité ( $kg / m^3$ )	Chaleur spécifique ( $kJ / kg.K$ )
Briques	0,925	2100	0,92
Mortier de ciment	0,97	1600	0,84
Isolation (S10)	0,043	679,6	1,4904

### D. L'analyse du coût du cycle de vie (LCC)

Pour réduire la consommation énergétique relative au chauffage et à la climatisation, l'incorporation d'isolants thermiques dans l'enveloppe des bâtiments est cruciale. Pour une efficacité optimale, il est essentiel de déterminer l'épaisseur appropriée de l'isolant en fonction de ses caractéristiques. L'analyse du coût du cycle de vie constitue une méthode éprouvée pour minimiser le coût total actualisé de l'énergie sur la durée de vie du bâtiment. Elle prend en compte le taux d'inflation ( $i$ ), le taux d'actualisation ( $d$ ), ainsi que la consommation d'énergie associée à l'épaisseur de l'isolant. L'équation (4) [13] permet d'estimer le coût total par unité de surface murale.

$$LCC = \underbrace{C_{ins} \times e_{ins}}_{C_i} + \underbrace{NPV \times C_{enr}}_{C_e} \quad (4)$$

$NPV$  représente le facteur de valeur actuelle et  $C_{enr}$  le coût énergétique annuel total.  $C_{ins}$  représente le coût par unité de volume de l'isolant thermique, et  $e_{ins}$  l'épaisseur de cet isolant.

Le coût énergétique annuel ( $\$/m^2$ ) est la somme des coûts annuels de chauffage et de refroidissement, qui sont calculés à l'aide de l'équation (5) [9] :

$$C_{enr} = \frac{Q_c \times C_{el}}{COP \times 3.6 \times 10^6} + \frac{Q_h \times C_{el}}{H_u \times \eta_s} \quad (5)$$

COP représente le coefficient de performance du système de refroidissement (PAC).  $C_{el}$  est le coût de l'électricité.  $H_u$  correspond au pouvoir calorifique inférieur de l'électricité. Enfin,  $\eta_s$  est l'efficacité du système de chauffage.

La NPV a été calculée en tenant compte du taux d'actualisation ( $d$ ), du taux d'inflation ( $i$ ), et du période d'analyse ( $N$ ) est généralement d'environ 20 à 30 ans pour les bâtiments au Maroc. En utilisant les expressions suivantes (6) :

$$NPV = \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \quad \text{if } i > d; r = (i-d)/(i+d) \text{ or } i < d; r = (d-i)/(i+1) \quad (6)$$

$$NPV = \frac{N}{1+i} \quad \text{if } i = d$$

**TABLEAU 5. Paramètres utilisés dans le calcul économique**

Paramètre	Valeur
Coût de l'électricité ( $C_{el}$ ), [14]	0.10 \$/KWh
Coefficient de performance ( $COP$ ), [15]	3
Pouvoir calorifique ( $H_u$ ), [16]	$3.6 \times 10^6 \text{ j} / \text{m}^3$
Efficacité ( $\eta_s$ ), [16]	0.99
Coût de l'isolation ( $C_{ins}$ ), [7]	$30.43 \text{ \$} / \text{m}^3$
Taux d'inflation ( $i$ ), [11]	2.5%
Taux d'actualisation ( $d$ ), [11]	5.5%
Période d'analyse ( $N$ ), [13]	20 years

#### E. Modèle de simulation

Dans cette partie, nous procéderons à une simulation numérique pour évaluer la performance thermique et le comportement dynamique de deux configurations de murs :

- La première configuration utilisera un matériau isolant en aérosil ;
- La seconde configuration exploitera une solution innovante intégrant une lame d'air pour réduire au minimum l'épaisseur d'isolation requise.

Cette simulation est réalisée à l'aide de la méthode CFD (Dynamique des Fluides Numérique) en utilisant le logiciel Ansys/Fluent 19.0. Nous avons appliqué cette analyse dynamique au cas de

murs orientés vers le sud situés dans les zones climatiques d'Ifrane, Fès et Marrakech, où une minimisation de l'épaisseur optimale est nécessaire.

Le modèle physique utilisé pour simuler le transfert de chaleur à travers les murs détaillé ci-dessous "Fig. 2". La conduction se produit à travers les matériaux solides composant le mur, tels que le mortier de ciment, les briques et l'aérosil. En revanche, la convection se produit dans la partie fluide, notamment dans la lame d'air, ainsi qu'entre le mur et l'intérieur, en tenant compte d'un contact parfait entre toutes les couches.

Les hypothèses prises en compte pour les calculs CFD sont les suivantes :

- Modélisation 2D (calculs numériques bidimensionnels) ;
- Écoulement laminaire non ventilé de l'air avec transfert de chaleur instable ;
- Propriétés isotropes des matériaux ;
- La convection dans l'espace rempli d'air est supposée naturelle ( $Ra < 10^6$ );
- L'air est considéré comme un fluide newtonien, et on suppose que la contrainte de cisaillement résultant du glissement de l'air aux interfaces des parois de la fente est négligeable.

*Equation d'énergie :*

L'équation d'énergie est résolue pour décrire la dynamique des champs de température de l'air dans la cavité et la transmission thermique à travers les différentes sections. Cela est exprimé dans l'équation (7) [4], où  $C_p$  représente la capacité thermique et  $\lambda$  la conductivité thermique.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (7)$$

*Equation de conservation de la masse*

La résolution des équations de Navier-Stokes permet de déterminer l'évolution instantanée des champs de vitesse et de pression dans la cavité [4].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (8)$$

*Équation de conservation de la quantité de mouvement*

Les équations de mouvement de l'air remplissant l'entrefer sont exprimées par (9) [13].

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + (\rho u \cdot \nabla) u = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} - \rho \beta (T - T_{ref}) g \quad (9)$$

$$\bar{\tau} = \mu [(\nabla u + \nabla u^T)] \quad (10)$$

Il convient de noter que  $u$  est le vecteur vitesse de l'écoulement,  $p$  est la pression statique et  $\bar{\tau}$  est le tenseur des contraintes décrit dans (10). En outre, le terme  $\rho \beta (T - T_{ref}) g$  désigne les forces corporelles gravitationnelles exprimées selon l'approximation de Boussinesq [4].

Il est important de noter aussi que le couplage entre la pression et la vitesse a été défini à l'aide d'un algorithme implicite. De plus, un schéma numérique du second ordre a été appliqué aux

équations de quantité de mouvement et d'énergie, ainsi qu'à la discrétisation du schéma d'interpolation de la pression. Enfin, les résultats numériques ont été considérés comme convergents lorsque les résidus de la vitesse de l'air et de l'énergie étaient inférieurs à  $10^{-6}$ .

#### Conditions aux limites

Les équations (11) et (12) définissent les conditions aux limites pour les surfaces extérieures et intérieures de la paroi, respectivement. Les autres côtés de la paroi sont considérés comme adiabatiques (13).

$$-\lambda_0 \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h_e (T_{sa}(t) - T_{x=0}) \quad (11)$$

$$-\lambda_l \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h_i (T_{x=L}(t) - T_{in}(t)) \quad (12)$$

$$\frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = \frac{\partial T(x, l, t)}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$h_e$  et  $h_i$  représentent les coefficients de transfert de chaleur radiatif et convectif combinés sur les surfaces des parois extérieure et intérieure, respectivement. Le coefficient  $h_e$  est calculé à l'aide de (14) :

$$h_e = D + EV_{wind} + FV_{wind}^2 \quad (14)$$

Les constantes empiriques  $D$ ,  $E$  et  $F$  dépendent du type de surface.  $V$  est la vitesse du vent. Pour la brique et le plâtre :  $D = 12,49$ ,  $E = 4,065$  et  $F = 0,028$  [17]. Le coefficient de transfert de chaleur par convection à l'intérieur  $h_i$  est déterminé par l'équation (15) :

$$h_i = 3.08 + 5.72\varepsilon_i \quad (15)$$

Dans cette étude, une émissivité  $\varepsilon_i$  de 0,90 est considérée pour la surface non réfléchissante. Le coefficient de transfert thermique convectif intérieur  $h_i$  est estimé à  $8,22 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

$T_{sa}$  représente la température de l'air solaire combinant les effets du rayonnement solaire et de la température extérieure, est calculé à l'aide de (16) : selon Yumrutas et al [18].

$$T_{sa}(t) = T_a(t) + \frac{a_s R_s(t)}{h_e} - \frac{\varepsilon \sigma (T_a^4 - T_{surr}^4)}{h_e} \quad (16)$$

L'équation (16) permet de calculer la température de l'air solaire  $T_{sa}$ , qui combine les effets du rayonnement solaire  $R_s$  et de la température ambiante  $T_a$ . Cette équation fait intervenir l'absorptivité solaire  $a_s$ , le coefficient de transfert de chaleur convectif-radiatif combiné  $h_e$ , l'émissivité  $\varepsilon$ , la constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma$  et la température moyenne de surface  $T_{surr}$  [19]. Le dernier terme est généralement négligeable pour les parois verticales selon Kontoleon et al [20], en raison de la faible température effective du ciel.

Les données météorologiques utilisées proviennent de la base de données Meteonorm [21] pour les villes d'Ifrane, Fès et Marrakech (Maroc). Elles concernent les 2 jours les plus chauds et les 2 jours les plus froids de l'année. Ces données comprennent le rayonnement solaire  $R_s$ , la température  $T_a$  et la vitesse du vent pour une orientation sud.

La température de l'air solaire  $T_{sa}$  est d'abord calculée avec Matlab pour une surface extérieure standard ( $a_s = 0,7$ ) selon [22]. Elle est ensuite déterminée pour la surface murale étudiée "Fig. 2".

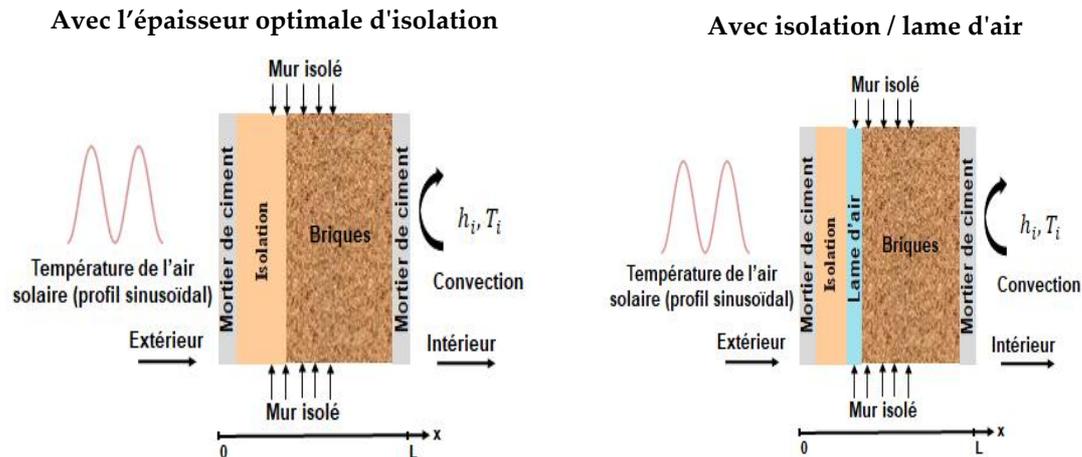


FIGURE 2. Les conditions aux limites

Les 4 jours les plus extrêmes (2 les plus chauds et 2 les plus froids) pour les trois villes, ont été choisis afin d'analyser la performance du mur avec l'aérosil et lame d'air. Les conditions limites de cette étude sont détaillées dans la "Fig. 2". La température de la surface extérieure est considérée comme égale à la température de l'air solaire. Celle-ci est assimilée à un signal sinusoïdal (17) et implémentée dans le code CFD via une fonction définie par l'utilisateur [23].

$$T_{sa-UDF}(t) = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{24} - \frac{\pi}{2}\right) + \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}\right) \quad (17)$$

$T_{\max}$  et  $T_{\min}$  représentent les températures maximales et minimales de l'air solaire. Un transfert de chaleur unidimensionnel est considéré de l'extérieur (à gauche) vers l'intérieur (à droite).

#### IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

##### A. Analyse des besoins en chauffage et en climatisation

En période hivernale, les configurations non isolées présentent des demandes annuelles d'énergie pour le chauffage d'environ 34,71 ; 46,55 ; 72,63 ; 106,62 ; 42,28 et 57,99  $kWh / m^2$  pour les murs étudiés "voir Fig.1" situés respectivement dans les villes d'Agadir, Tanger, Fès, Ifrane, Marrakech et Errachidia. Avec l'ajout de 2 cm d'isolation, ces valeurs diminuent à 16,63 ; 22,30 ; 34,80 ; 51,08 ; 20,26 et 27,78  $kWh / m^2$  ce qui représente une baisse significative de la demande énergétique. Durant la saison estivale, les configurations non isolées présentent des consommations d'énergie respectives de 30,8 ; 24,73 ; 39,93 ; 28,99 ; 58,44 et 78,91  $kWh / m^2$  pour les mêmes zones

climatiques. Avec l'ajout de la même épaisseur d'isolant, ces valeurs sont réduites à 14,75 ; 11,85 ; 19,13 ; 13,89 ; 28,00 et 37,81  $kWh / m^2$  ce qui démontre une réduction significative de la demande énergétique.

Ces données mettent en évidence les demandes d'énergie pour le chauffage en hiver et la consommation d'énergie en été dans différentes zones climatiques du Maroc. L'intégration d'une isolation entraîne une diminution significative de ces chiffres, soulignant ainsi le rôle crucial de l'isolation dans la réduction de la consommation énergétique pour le chauffage hivernal et la climatisation estivale. Ces résultats peuvent avoir un impact considérable sur l'efficacité énergétique des bâtiments, permettant ainsi des économies substantielles en énergie. Il est important de noter que cette réduction de la consommation énergétique contribue également à réduire les coûts énergétiques et à atténuer l'empreinte carbone associée à la climatisation et au chauffage des bâtiments.

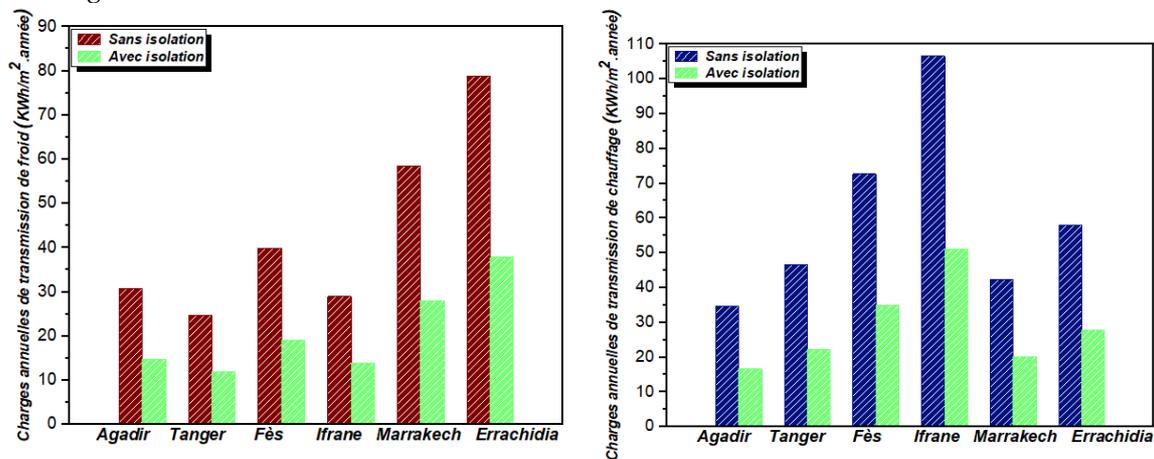
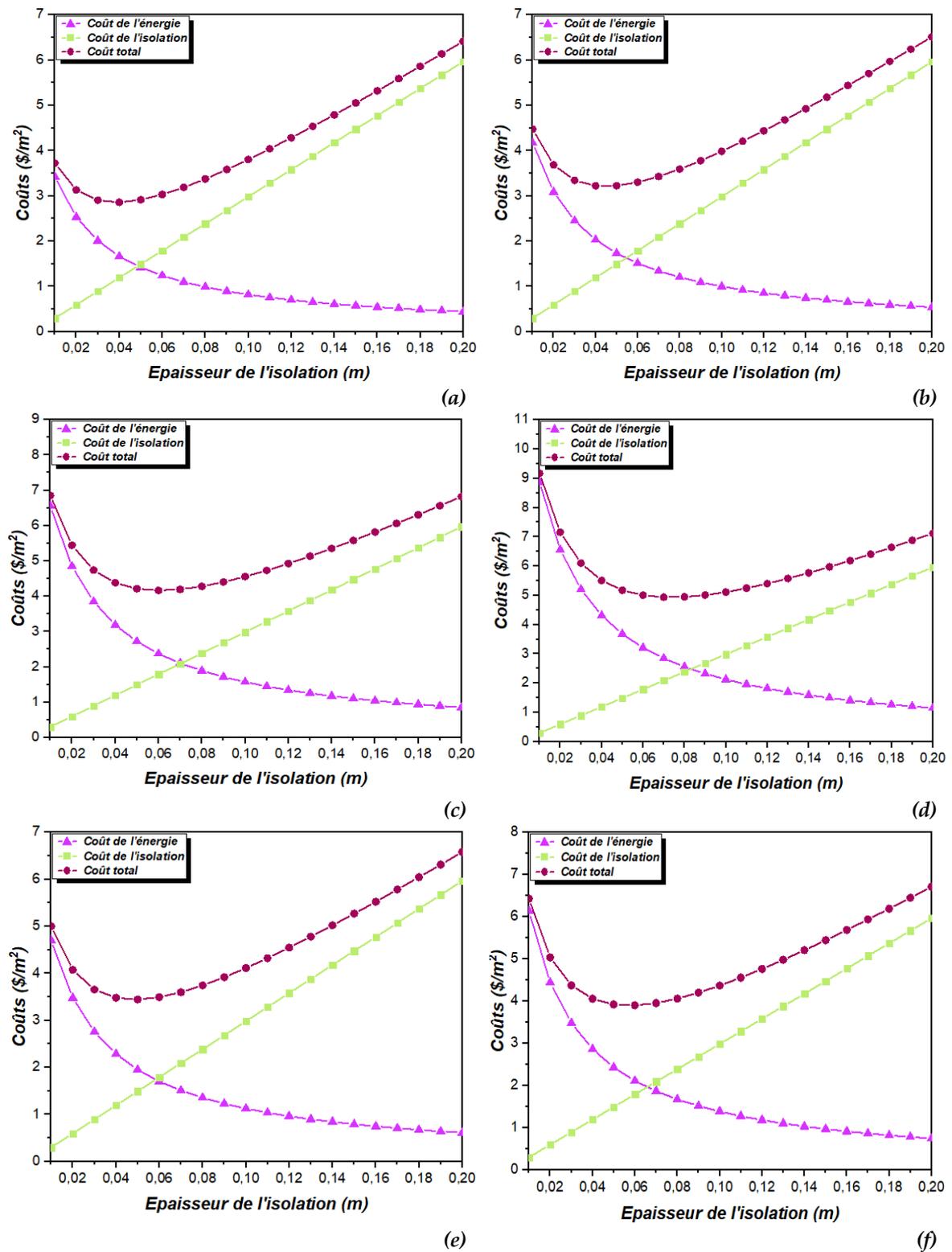


FIGURE 3. Charges de transmission

#### B. L'épaisseur optimale de l'isolation

L'épaisseur optimale de l'isolation (OIT) est déterminée sur la base des charges thermiques simulées pour les 6 zones climatiques marocaines. Ces charges thermiques servent de données d'entrée pour l'analyse du coût du cycle de vie (LCCA).

La figure 4 illustre l'évolution des coûts d'isolation, d'énergie et totaux en fonction de l'épaisseur de l'isolation. L'augmentation de l'épaisseur de l'isolation réduit les coûts énergétiques, mais entraîne une augmentation linéaire des coûts d'isolation.



**FIGURE 4.** Évolution des coûts d'isolation, d'énergie et totaux en fonction de l'épaisseur de l'isolant, pour les six zones climatiques marocaines : (a)-Agadir (b)-Tanger (c)-Fès (d)-Ifrane (e)-Marrakech (f)-Errachidia

L'OIT représente le coût total minimum, qui englobe à la fois les coûts de l'énergie et de l'isolation. Les valeurs de l'OIT obtenues sont les suivantes 0,04 m (Agadir) ; 0,04 m (Tanger) ; 0,06 m (Fès) ; 0,07 m (Ifrane) ; 0,05 m (Marrakech) ; et 0,06 m (Errachidia).

Le texte décrit la détermination de l'épaisseur optimale d'isolation (OIT) en fonction des charges thermiques dans différentes zones climatiques au Maroc. La figure montre comment l'épaisseur de l'isolation affecte les coûts de l'énergie et de l'isolation. L'OIT est l'épaisseur qui permet d'obtenir le coût total le plus bas, en tenant compte des deux facteurs. Les valeurs de l'OIT varient d'une ville à l'autre, reflétant les conditions climatiques et les coûts énergétiques qui leur sont propres.

### *C. Résultats de simulation*

Les matériaux de construction les plus courants au Maroc comprennent la brique, le béton et le mortier de ciment. En raison des conditions climatiques extérieures, de nombreuses structures sont confrontées à des situations thermiques inconfortables. L'objectif de cette étude est d'analyser l'efficacité isolante de l'aérosil et de déterminer l'épaisseur optimale nécessaire pour réduire les charges thermiques. Plusieurs recherches ont ainsi identifié l'épaisseur idéale d'isolation des murs extérieurs en prenant en compte l'orientation du mur, qui varie en fonction du climat. Comme l'a montré une étude menée par Ozel et ses coll. [24], l'utilisation de polystyrène extrudé dans le climat d'Elazığ en Turquie a révélé une épaisseur optimale de 5,5 cm pour les orientations Sud et Nord, et de 6 cm pour les orientations Est et Ouest. De même, une étude similaire menée par Daouas et ses coll. [5], dans le climat de Tunis, en Tunisie, a indiqué que l'épaisseur optimale d'isolation était de 10,1 cm pour les orientations Sud et Nord, et de 11,7 cm et 11,6 cm respectivement pour les orientations Est et Ouest.

Suite à la reconnaissance du besoin important en isolation, en particulier dans les régions d'Ifrane, Fès et Marrakech, nous proposons une solution innovante : l'ajout d'une lame d'air non ventilée de 2 cm pour réduire l'épaisseur de l'aérosil à 5 cm pour les murs à Ifrane, et à 4 cm et 3 cm pour ceux de Fès et Marrakech respectivement. Cette lame d'air constante permet également le passage du rayonnement solaire en hiver, offrant ainsi une isolation thermique supplémentaire.

Dans ce cas, la méthode du transfert de chaleur instantané est utilisée pour évaluer l'impact de cette solution visant à minimiser les fluctuations de température intérieure, influencées par le profil sinusoïdal de la température extérieure. Cela permet d'obtenir une stabilisation supplémentaire de la température à la surface intérieure, ce qui a un impact direct sur le confort thermique. Les configurations des murs comprennent respectivement 7 cm, 6 cm et 5 cm d'aérosil pour la première, et 5 cm, 4 cm et 3 cm d'aérosil avec une lame d'air de 2 cm pour la deuxième configuration. Ces configurations sont étudiées dans les trois villes mentionnées ci-dessus. La figure 5 présente les profils de température de la surface intérieure pour les deux configurations étudiées : l'une avec l'épaisseur optimale d'aérosil et l'autre avec une lame d'air et une épaisseur moindre d'isolant, dans les trois villes où une épaisseur importante d'aérosil est requise. La simulation met en évidence l'impact de l'ajout d'une lame d'air sur la température de la surface intérieure, montrant une diminution significative de la température à la fois en été et en hiver. Chacune de ces températures se situe autour des niveaux de confort thermique recommandés, soit 26°C pour l'été et 20°C pour l'hiver, ainsi qu'une stabilisation et une réduction des fluctuations de température, en particulier en été dans la zone climatique de Fès, et également en été et en hiver à Marrakech. Les avantages de cette solution de lame d'air par rapport à la configuration sans lame d'air se manifestent par une réduction de la quantité de matériau isolant nécessaire, ce qui entraîne une optimisation des coûts.

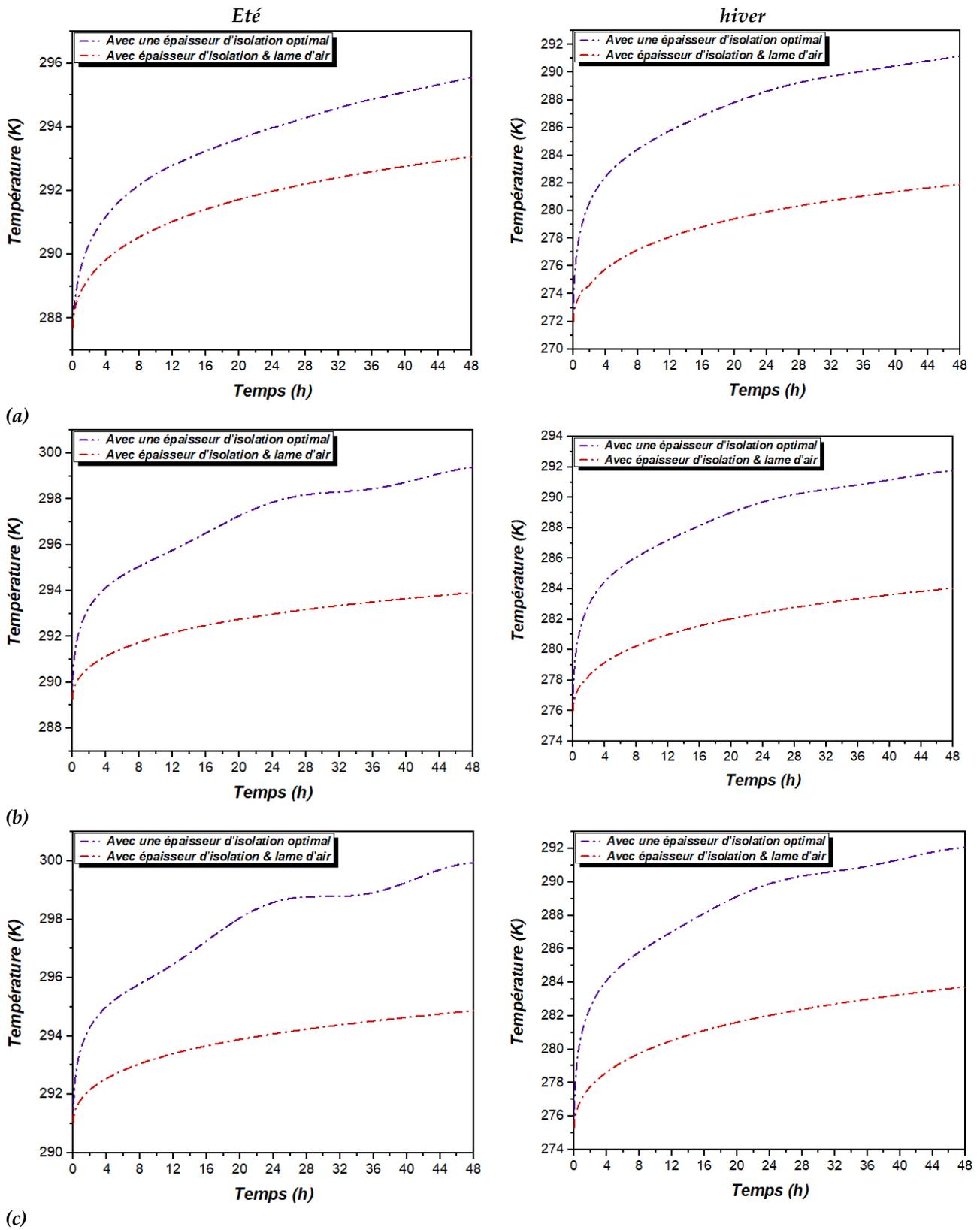


FIGURE 5. Profil de température : (a)-Ifrane (b)-Fès (c)-Marrakech

## V. CONCLUSION

Cette étude s'est appuyée sur le concept du degré-jour et a mené une analyse approfondie du coût du cycle de vie afin d'évaluer à la fois la performance thermique et économique des matériaux d'isolation utilisés dans les murs des bâtiments à travers les différentes zones climatiques du Maroc. En parallèle, une simulation numérique dynamique a été réalisée, permettant d'affiner l'épaisseur optimale de l'isolation, et stabilisé la température de la surface intérieure.

La conclusion principale de cette recherche se résume en trois résultats majeurs. Tout d'abord, une réduction significative de la consommation énergétique a été observée dans la configuration utilisant l'aérosil, dans toutes les zones climatiques du Maroc, en particulier dans la zone climatique d'Ifrane. En été, la consommation est passée de 28,99 à 13,89  $kWh / m^2$ , et en hiver de 106,62 à 51,08  $kWh / m^2$ . Ensuite, un point important découle de la variabilité de l'épaisseur optimale de l'isolation (OIT) en fonction des charges de refroidissement et de chauffage. Par exemple, dans la région d'Ifrane où les demandes en refroidissement et chauffage sont élevées, l'OIT est de 7 cm. Toutefois, grâce à une solution ingénieuse intégrant une lame d'air, cette épaisseur a pu être réduite à 5 cm, 4 cm et 3 cm pour Ifrane, Fès et Marrakech respectivement. Cette adaptation a permis d'obtenir des économies d'énergie significatives et une stabilisation de la température intérieure.

Ces résultats mettent en lumière l'importance de stratégies d'isolation adaptées aux différentes zones climatiques et démontrent le potentiel des solutions innovantes telles que les lames d'air pour améliorer l'efficacité énergétique dans la conception des bâtiments. En conclusion, cette étude représente une ressource précieuse pour optimiser l'isolation des bâtiments et réduire la consommation d'énergie dans une variété de climats.

La méthode des degrés-jours peut conduire à une estimation peu précise des paramètres économiques. Afin d'obtenir des résultats plus précis, il est essentiel de déterminer les charges de transmission de chaleur à travers les murs du bâtiment dans des conditions thermiques dynamiques. Cela permettra une évaluation plus fidèle des coûts énergétiques et une meilleure optimisation des performances thermiques du bâtiment.

## REFERENCES

- [1] Buildings - Energy System , IEA. <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
- [2] A. De Gracia, A. Castell, & al. (2013) -- Numerical modelling of ventilated facades: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, p. 539-549, <http://10.1016/j.rser.2013.02.029>
- [3] W. Pasut, M. De Carli (2012) -- Evaluation of various CFD modelling strategies in predicting airflow and temperature in a naturally ventilated double skin façade, *Applied Thermal Engineering*, vol. 37, p. 267-274, <http://10.1016/j.applthermaleng.2011.11.028>
- [4] O. Iken, S. ed-Dîn Fertahi, M. Dlimi, R. Agounoun, I. Kadiri, & K. Sbai, (2019) -- Thermal and energy performance investigation of a smart double skin facade integrating vanadium dioxide through CFD simulations, *Energy Conversion and Management*, vol. 195, p. 650-671, <http://doi:10.1016/j.enconman.2019.04.070>.
- [5] N. Daouas (2011) -- 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, p. 156–164, <http://doi:10.1016/j.apenergy.2010.07.030>
- [6] M. Ozel (2013) -- Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate, *Energy Conversion and Management*, vol. 66, p. 106–114, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.002>
- [7] S. Ouhaibi & al. (2021)-- Thermally insulating gypsum composites incorporating aerosil for sustainable energy-saving buildings. *Journal of Building Engineering*, vol. 43, pp. 102848. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102848>
- [8] J. Barbosa Brito & al. (2017) -- Photoluminescence of silica monoliths prepared from cold sintering of nanometric aerosil precursors under high pressure, *Journal of Luminescence*, vol. 187, p.154–159, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.03.013>
- [9] Reglement thermique de construction au Maroc-  
[https://www.amee.ma/sites/default/files/inline/files/Reglement thermique de construction au Maroc.pdf](https://www.amee.ma/sites/default/files/inline/files/Reglement_thermique_de_construction_au_Maroc.pdf)
- [10] E. Küçüktopcu & B. Cemek,(2018) -- A study on environmental impact of insulation thickness of poultry building walls , *Energy*, vol. 150, p. 583-590.<https://doi:10.1016/j.energy.2018.02.153>.
- [11] A. Benallel, A. Tilioua, A. Mellaikhafi, & M. A. A. Hamdi, (2022) -- Thickness optimization of exterior wall insulation for different climatic regions in Morocco. *Materials Today: Proceedings*, vol. 58, p. 1541-1548.<https://doi:10.1016/j.matpr.2022.03.324>.
- [12] M. Fellah, S. Ouhaibi, N. Belouaggadia, K. Mansouri, & L. Zahiri,(2023) -- Numerical study of a new ecological material in moroccan climate: CFD approach. *3rd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, p. 1-8. <https://doi:10.1109/IRASET57153.2023.10152929>.
- [13] M. Dlimi, O. Iken, R. Agounoun, A. Zoubir, I. Kadiri, & K. Sbai, (2019) -- Energy performance and thickness optimization of hemp wool insulation and air cavity layers integrated in Moroccan building walls'. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 20, p. 273-288.<https://doi:10.1016/j.spc.2019.07.008>.
- [14] ONEE, National Office of Electricity and Drinking Water, -- Site web officiel de l'ONEE - Branche Electricité. <http://www.onee.org.ma/>.
- [15] A. Gounni & al., (2019) -- Thermal and economic evaluation of new insulation materials for building envelope based on textile waste, *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, p. 475-483, <http://doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.057>.
- [16] A. Bolattürk, (2006) -- Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey, *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no 11-12, p. 1301-1309. <http://doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.10.019>.
- [17] M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, & J. L. M. Hensen, (2013) -- Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty, *Applied Thermal Engineering*, vol. 56, no 1-2, p. 134-151, <http://doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003>.

- 
- [18] R. Yumrutaş, Ö. Kaşka, & E. Yıldırım, (2007) -- Estimation of total equivalent temperature difference values for multilayer walls and flat roofs by using periodic solution, *Building and Environment*, vol. 42, no 5, p. 1878-1885, <http://doi: 10.1016/j.buildenv.2006.02.020>.
- [19] Mohammed J. & Al-Khawaja, (2004) -- Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation, *Applied Thermal Engineering*, p. 10, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.03.019>.
- [20] K. J. Kontoleon & E. A. Eumorfopoulou, (2008) -- The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region, *Renewable Energy*, p. 13, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.008>.
- [21] METEONORM V8.1.4 (2022) -- Software application available from Meteotest, Meteonorm. <https://meteonorm.com/>.
- [22] J. A. Reagan & D. M. Acklam, (1979) -- Solar reflectivity of common building materials and its influence on the roof heat gain of typical southwestern U.S.A. residences, *Energy and Buildings*, vol. 2, no 3, p. 237-248, [http://doi: 10.1016/0378-7788\(79\)90009-4](http://doi: 10.1016/0378-7788(79)90009-4).
- [23] D. Risberg, M. Risberg, & L. Westerlund, (2016) -- CFD modelling of radiators in buildings with user-defined wall functions, *Applied Thermal Engineering*, vol. 94, p. 266-273, <http://doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.134>.
- [24] M. Ozel, (2011)-- Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method, *Applied Energy*, vol.88, p. 2429–2435, <http://doi:10.1016/j.apenergy.2011.01.049>