



ETUDE SUR L'OPTIMISATION DE L'ENVELOPPE EXTERIEURE DES BATIMENTS RESIDENTIELS EN TUNISIE ET SON EFFET SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE ET LE CONFORT INTERNE

Khawla SAAFI, Naouel DAOUAS
Laboratoire de Métrologie et des Systèmes Energétiques
Département de Génie Energétique
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir
Rue Ibn El Jazzar, 5019, Monastir, Tunisie
saafi.khawla92@gmail.com, naou.daouas@gnet.tn

Résumé

Ce travail a pour objectif l'étude des performances thermiques et l'optimisation de l'enveloppe des bâtiments résidentiels en Tunisie. L'impact de l'enveloppe sur l'efficacité énergétique et le confort interne a été analysé, à l'aide du logiciel de simulation «EnergyPlus», en se basant sur le choix des matériaux, l'orientation, l'isolation thermique, l'inertie thermique et le concept des toits refroidissants. En effet, nous avons montré l'avantage des murs en pierres et des toits en terre cuite en termes de coût annuel d'énergie et d'inertie thermique. Les résultats ont prouvé que l'orientation Nord est la plus économique alors que l'orientation Est est la plus favorable en terme d'inertie thermique. L'intégration d'un isolant thermique, a permis une nette réduction du coût annuel d'énergie. Une meilleure performance de l'enveloppe par rapport au confort interne est obtenue en répartissant l'isolant en deux ou trois couches. Par ailleurs, nous avons montré que l'utilisation des toits refroidissants constitue une bonne alternative à l'isolation dans le contexte du climat tunisien.

Mots clés :

Bâtiment, enveloppe multicouche, isolation thermique, Inertie thermique, déphasage, facteur d'amortissement, toit refroidissant, économies d'énergie, performance thermique, efficacité énergétique, confort interne, climat Tunisien.

Introduction

Les bâtiments sont responsables de 40% de la consommation énergétique mondiale et des émissions de gaz à effet de serre. Environ 60% de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment est due aux systèmes de refroidissement, de chauffage et de ventilation. Cette demande a connu une augmentation annuelle de 1,8% durant les quarante dernières années [1]. A l'échelle nationale, la consommation énergétique a enregistré une augmentation régulière, corrélée à l'augmentation démographique et au développement économique du pays. En effet, le secteur du bâtiment en Tunisie est actuellement premier consommateur d'énergie avec 37 % de la consommation de l'énergie finale [2]. Ce secteur représente ainsi un enjeu majeur d'économie d'énergie.

L'enveloppe du bâtiment, représentée notamment par les murs externes et les toits, constitue l'interface qui sépare l'intérieur de l'environnement extérieur. Exposée directement aux sollicitations externes, y compris le rayonnement solaire, l'enveloppe est l'un des principaux éléments qui affectent la qualité des conditions intérieures du bâtiment. Le choix des matériaux de construction, l'orientation des bâtiments, l'isolation thermique, l'inertie thermique et le concept des toits refroidissants sont parmi les facteurs les plus influents sur les performances thermiques de l'enveloppe et par conséquent sur la consommation énergétique et le confort interne. Dans ce contexte, Aktacir et al. [3] ont étudié l'effet de l'isolation thermique sur la réduction des besoins en énergie de rafraîchissement pour un bâtiment situé à Adana en Turquie (climat méditerranéen). Belhadj et al. [4] ont montré que l'intégration de la paille d'orge (avec la proportion étudiée) dans le béton de sable améliore considérablement ses propriétés thermophysiques. Ils ont, par ailleurs, étudié l'effet de cette nouvelle

composition sur le comportement thermique des murs extérieurs, à savoir le déphasage et le facteur d'amortissement. Medjelekh et al. [5] ont évalué l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique des bâtiments en réalisant une comparaison entre une maison de l'époque coloniale et une villa contemporaine. Leurs résultats ont montré que l'utilisation d'un matériau local adapté au climat de la région permet d'obtenir un confort hygrothermique et réduire la consommation d'énergie. Daouas et al. [6] ont développé leur propre modèle dynamique analytique basé sur la méthode de la transformée complexe de Fourier (CFFT) afin d'estimer rigoureusement l'épaisseur d'isolation optimale. Les résultats d'une analyse économique sur un cycle de vie du bâtiment ont montré que le cas le plus rentable est celui du mur double cloison pierres/briques isolé avec le polystyrène expansé d'épaisseur optimale estimée à 5,7cm. Dans ce cas, les économies d'énergie s'élèvent à 58% avec une période d'amortissement de 3,11 ans. Le même modèle analytique a été utilisé par Daouas [7] en mettant l'accent sur l'effet de l'orientation du mur sur l'épaisseur d'isolation optimale et sur l'économie d'énergie associée. Les résultats ont montré que l'orientation sud est la plus économique avec une épaisseur optimale de polystyrène expansé de 10,1 cm. Les travaux de Asan [8] et de Ozel et Pihili [9] ont porté sur la distribution optimale des couches d'isolation dans les murs afin d'avoir un déphasage maximal et un facteur d'amortissement minimal. Al-Sanea et Zidan [10] ont opté pour une optimisation simultanée de l'épaisseur d'isolation et de la position des couches d'isolant dans un mur externe en béton orienté Ouest, soumis au climat de Riadh. Cette optimisation vise à réduire la consommation énergétique d'une part, et à assurer un meilleur confort d'une autre part. Fezzioui et al. [11] ont utilisé le logiciel TRNSYS pour étudier l'influence de l'enveloppe du bâtiment sur sa demande énergétique en période de chauffage. Ils ont introduit des éléments d'amélioration de l'habitat étudié, à savoir l'augmentation de l'inertie thermique et l'isolation des murs extérieurs et de la toiture.

L'isolation des toitures est l'une des mesures les plus efficaces dans le contexte climatique de la Tunisie. En effet, une étude récente sur l'optimisation de l'épaisseur d'isolation des toitures a été présentée par Daouas [12] pour des structures couramment utilisées dans les constructions tunisiennes. Parmi les différents cas étudiés, le toit en terre cuite isolé avec la laine de roche est le plus économique avec une épaisseur d'isolation optimale estimée à 7,9 cm et des économies d'énergie qui s'élèvent à 58,06%. Par ailleurs, l'efficacité des toits refroidissants "cool roofs" dans le contexte climatique tunisien a été également prouvée. Pisello et al. [13] ont développé des stratégies passives relatives aux toits refroidissants, pour améliorer le confort à l'intérieur d'une chambre d'un immeuble résidentiel situé au centre de l'Italie. En remplaçant des tuiles en briques traditionnelles de couleur brune par des tuiles innovantes d'argile fraîche, ils ont noté une différence de la température de l'air de 2,79K et de 1,54K respectivement en été et en hiver. Ramamurthy et al. [14] ont analysé, pour une structure de toit conventionnelle, l'impact de la réflectivité solaire de la surface externe et de l'épaisseur d'isolation sur la consommation énergétique annuelle. Leur but étant d'identifier une combinaison optimale entre ces deux paramètres. Une synthèse de nombreuses études sur l'optimisation de l'enveloppe des bâtiments a été présentée par Huang et Niu [15] qui ont résumé les objectifs ciblés par l'optimisation et comparé les algorithmes d'optimisation les plus populaires.

Dans ce papier, on se propose d'étudier le comportement et les performances thermiques dynamiques de différentes structures de murs et de toits, typiques aux constructions tunisiennes, dans le but d'effectuer une optimisation de l'enveloppe multicouche extérieure des bâtiments résidentiels en Tunisie. L'impact de l'enveloppe sur l'efficacité énergétique et le confort interne sera analysé en se basant sur le choix des matériaux, l'orientation, l'isolation thermique, l'inertie thermique et le concept des toits refroidissants. Cette étude sera menée en utilisant comme outil de base le logiciel de simulation énergétique des bâtiments «EnergyPlus».

1. Méthodologie

1.1. Formulation du problème de transfert de chaleur

Dans ce travail on s'intéresse à l'étude de la conduction thermique transitoire monodimensionnelle à travers un mur plan infini, homogène et isotrope, d'épaisseur $e = \sum_{j=1}^N e_j$ (figure 1). Il s'agit d'un mur composite constitué de N couches parallèles (chaque couche j est d'épaisseur e_j) de différents matériaux dont les propriétés thermophysiques sont supposées indépendantes de la température. Ce mur est exposé au niveau de sa face externe à l'air ambiant dont la température présente une variation périodique $T_e(t)$. Cette face est également exposée au rayonnement de courtes longueurs d'onde représenté par une densité de flux solaire périodique $q_s(t)$ et à un flux d'échange radiatif infrarouge $q_r(t)$ avec le ciel de température $T_c(t)$. Au niveau de la face interne, le mur est en contact avec l'air maintenu à une température de consigne T_i . L'échange sur les surfaces interne et externe se fait respectivement avec un coefficient d'échange combiné convection/rayonnement h_i et un coefficient d'échange convectif h_e .

En l'absence d'une source de chaleur interne, ce problème est régi par la forme suivante de l'équation de Fourier :

$$\frac{\partial^2 T_j}{\partial x_j^2} = \frac{1}{\alpha_j} \frac{\partial T_j}{\partial t} \quad \text{pour } 0 < x_j < e_j \text{ et } j=1,2,\dots,N \quad (1)$$

La température initiale du mur n'a aucun effet sur la solution stationnaire périodique du problème. Dans ce cas on utilise la condition de périodicité donnée, pour une période $p=24h$, par :

$$T_j(x_j, t) = T_j(x_j, t + p) \quad \text{pour } j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Le contact thermique entre les couches est considéré parfait. Cette condition est exprimée par les deux expressions suivantes :

$$T_j(x_j = e_j, t) = T_{j+1}(x_{j+1} = 0, t) \quad \text{pour } 1 \leq j \leq N-1 \quad (3)$$

$$-\lambda_j \left. \frac{\partial T_j}{\partial x_j} \right|_{x_j=e_j} = -\lambda_{j+1} \left. \frac{\partial T_{j+1}}{\partial x_{j+1}} \right|_{x_{j+1}=0} \quad \text{pour } 1 \leq j \leq N-1 \quad (4)$$

Les conditions aux limites sur les faces interne et externe du mur s'écrivent respectivement :

$$-\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=0} = h_i [T_i - T_1(x_1 = 0, t)] \quad (5)$$

$$-\lambda_N \left. \frac{\partial T_N}{\partial x_N} \right|_{x_N=e_N} = h_e [T_N(x_N = e_N, t) - T_e(t)] - a_s q_s(t) + q_r(t) \quad (6)$$

avec : $q_r(t) = \varepsilon \sigma [T_N^4(e_N, t) - T_c^4(t)]$

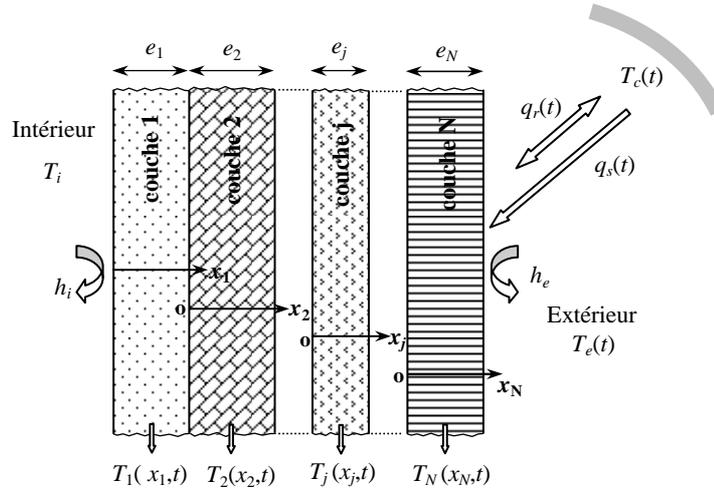


Figure 1 : Mur composite formé de N couches.

1.2. Logiciel de simulation énergétique des bâtiments EnergyPlus

L'optimisation de la conception de l'enveloppe du bâtiment passe par la modélisation de son comportement thermique dynamique afin d'évaluer les besoins de chauffage et/ou de refroidissement du bâtiment. Parmi les logiciels de simulation thermique dynamique, on peut citer: DeST (Designer's Simulation Toolkit), ESP-r (Energy Simulation Software), IDA ICE (Indoor Climate Energy), IES VE (Integrated Environmental Solutions-Virtual Environment) et TRNSYS (Transient System). EnergyPlus, inspiré des deux logiciels DOE-2 et BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics), est l'un des outils de simulation énergétique les plus connus. Son développement a commencé en 1996 et a été sponsorisé par le ministère de l'Énergie (DOE : Department Of Energy) des États-Unis [16]. Ce logiciel permet d'analyser l'énergie et la charge thermique dans tout le bâtiment. Il a été utilisé par des ingénieurs, des architectes et des chercheurs pour modéliser la consommation d'énergie et l'utilisation de l'eau dans les bâtiments.

EnergyPlus se base entre autres sur la méthode analytique des fonctions de transfert (CTF : Conduction Transfer Function Method) qui est une technique de résolution de l'équation de transfert de chaleur par

conduction transitoire. C'est une méthode efficace pour le calcul des flux de chaleur surfaciques. Elle est facile à appliquer aux constructions multicouches et est beaucoup plus rapide que les méthodes numériques. L'idée de base est de représenter le flux de chaleur sur les deux faces interne et externe d'un élément de construction à l'instant courant ($n.\Delta t$) sous la forme d'une relation linéaire avec les températures des deux faces à l'instant courant et à des instants antérieurs, ainsi qu'avec des valeurs antérieures des flux surfaciques. Cette relation est donnée par [17]:

$$\begin{pmatrix} q_{si,n} \\ q_{se,n} \end{pmatrix} = \sum_{j=0}^{nz} \mathbf{M}_j \begin{pmatrix} T_{si,n-j} \\ T_{se,n-j} \end{pmatrix} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j \begin{pmatrix} q_{si,n-j} \\ q_{se,n-j} \end{pmatrix} \quad (7)$$

où \mathbf{M}_j et Φ_j sont les matrices des coefficients CTF qui sont calculés séparément par différentes méthodes telle que la méthode de l'espace d'état utilisée dans EnergyPlus.

2. Description des murs et des toitures

Les modèles des murs et des toits étudiés sont des structures couramment utilisées dans les constructions tunisiennes (figures 2 et 3). Les propriétés thermophysiques des matériaux de construction sont fournies dans le tableau 1.

Les données climatiques relatives à la ville de Tunis (latitude: 36°50'N, longitude: 10°14'E, altitude : 4m) sont prises à partir du fichier climatique d'EnergyPlus. Dans le cas où toutes les mesures ne sont pas disponibles, le logiciel utilise le modèle ASHRAE par ciel clair pour fournir les valeurs du rayonnement incident direct, diffus et réfléchi par le sol.

La température de consigne de l'air intérieur est fixée à 24°C en été et 20°C en hiver. Les propriétés radiatives de la face externe des murs et des toits sont estimées à $a_s=0,4$ (valeur appropriée pour les surfaces de couleur claire) et $\varepsilon=0,9$ et les coefficients de transfert de chaleur sur les faces interne et externe sont fixés respectivement aux valeurs constantes $h_i=9\text{W/m}^2.\text{K}$ et $h_e=22\text{W/m}^2.\text{K}$.

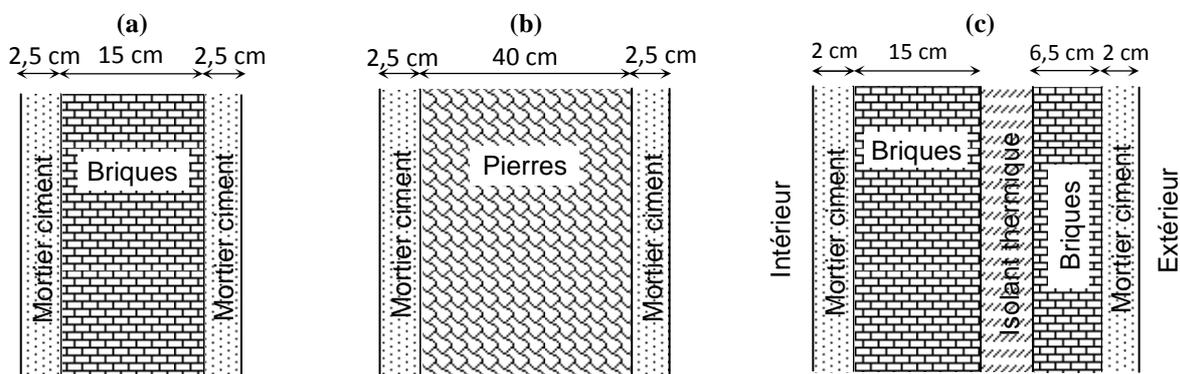


Figure 2 : Structures typiques de murs multicouches (a) Mur en briques **M1** (b) Mur en pierres **M2** (c) Mur isolé double cloison briques/briques **II1** [6]

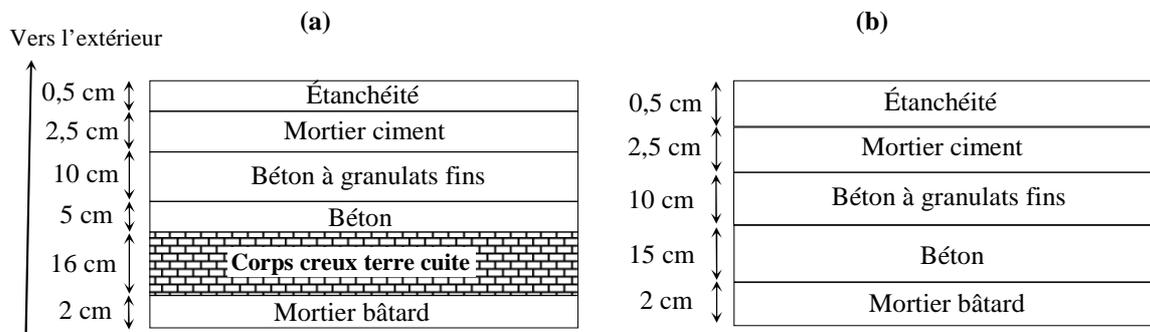


Figure 3 : Structures typiques de toitures multicouches non isolées. (a) Toit en terre cuite **T1** (b) Toit en béton **T2**.

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques des différents matériaux utilisés [18]

Matériaux/Grandeurs	λ (W/m.K)	$\alpha * 10^7$ (m ² /s)
Ciment	0,72	4,59594
Brique	0,697	3,98924
Pierre	1,7	6,8
Béton	2,5	10,4167
Béton à granulats fins	1,65	8,25
Corps creux terre cuite	0,2	3,07692
Mortier ciment	1,4	6,36364
Mortier bâtard	1	5,26316
Étanchéité bitumeuse	0,23	2
Polystyrène expansé	0,037	8,50575

Le facteur d'amortissement f et le déphasage ϕ sont deux paramètres dynamiques qui interviennent en régime transitoire. Ils caractérisent l'inertie thermique d'une paroi et informent sur ses capacités à fournir un bon confort thermique dans le bâtiment.

Le déphasage est défini comme étant le temps de réponse entre un pic de température sur la face externe et celui engendré sur la face interne, et le facteur d'amortissement représente le pourcentage de l'amplitude de l'onde thermique sur la face interne comparée à celle de la face externe (figure 4).

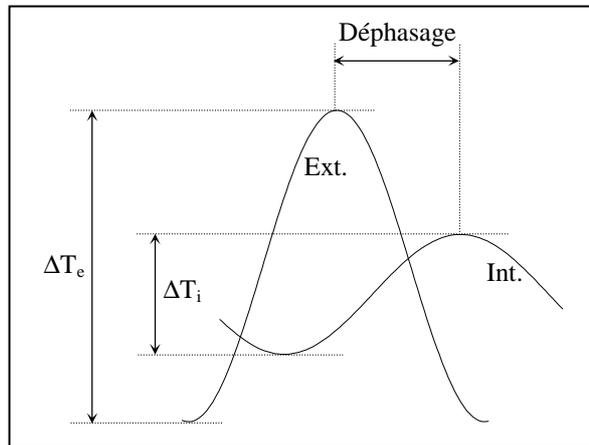


Figure 4 : Définitions du déphasage et du facteur d'amortissement

Ces deux paramètres sont donnés par les formules respectives suivantes (avec $p=24h$) [4]:

$$\phi = \begin{cases} t_{Ti,max} - t_{Te,max} & \text{si } t_{Ti,max} > t_{Te,max} \\ t_{Ti,max} - t_{Te,max} + p & \text{si } t_{Ti,max} < t_{Te,max} \\ p & \text{si } t_{Ti,max} = t_{Te,max} \end{cases} \quad (8)$$

$$f = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_e} = \frac{T_i^{max} - T_i^{min}}{T_e^{max} - T_e^{min}} \quad (9)$$

Ainsi, une paroi est d'autant plus performante que le déphasage ϕ est plus grand et le facteur d'amortissement f est plus faible.

3. Comportement thermique des parois non isolées

3.1. Effet du choix des matériaux de construction sur la consommation énergétique annuelle

Dans une première étude, nous avons montré l'importance du choix des matériaux de construction pour les murs et les toits et son effet sur la consommation énergétique annuelle. Le logiciel EnergyPlus nous a permis d'évaluer, dans le cas d'un conditionnement d'air continu et pour chaque type de paroi, la charge annuelle de chauffage et de refroidissement correspondante. Le coût annuel de la consommation d'énergie associée à la

charge calculée a été estimé en utilisant comme sources d'énergie: l'électricité pour le refroidissement en été et le gaz naturel pour le chauffage en hiver. En utilisant les données fournies dans le tableau 2, le coût annuel d'énergie par unité de surface de la paroi est donné par [12]:

$$C_{en} = \left\{ \frac{Q_f}{COP} \times \frac{c_{el}}{3,6 \times 10^6} \right\} + \left\{ \frac{Q_c}{H_u \eta_s} \times C_g \right\} \quad (10)$$

Tableau 2: Données pour le calcul du coût de l'énergie [12]

Climatisation (Electricité)		Chauffage (Gaz naturel)		
C_{el} (DT/kWh)	COP	C_g (DT/m ³)	H_u (J/m ³)	η_s
0,21	3	0,2515	34,526.10 ⁶	0,8

Le tableau 3 illustre les coûts d'énergie de chauffage et de refroidissement associés aux murs non isolés M1 et M2 (figure 2) selon les quatre orientations et aux toits non isolés T1 et T2 (figure 3) et ce, pour la saison de refroidissement (Juin - Septembre) et la saison de chauffage (Décembre - Février). Les résultats obtenus ont montré un léger avantage des murs en pierres comparés aux murs en briques (coûts annuels d'énergie respectifs de 2,59DT/m² contre 2,701DT/m² pour l'orientation Ouest). Par contre, les toits en terre cuite sont nettement plus économiques que les toits en béton (coûts annuels d'énergie respectifs de 1,214DT/m² contre 4,026DT/m²). L'étude de l'effet de l'orientation des murs sur la consommation annuelle d'énergie a permis de montrer que la plus grande consommation d'énergie de chauffage relative à l'orientation Nord (1,359 DT/m²) est largement compensée par les économies faites sur les charges de climatisation (0,892 DT/m²). Ainsi, en terme de coût annuel d'énergie, l'orientation Nord est la plus économique, alors que l'orientation Ouest est la plus défavorable. L'orientation Sud est celle qui présente le plus faible coût d'énergie en hiver.

Tableau 3 : Coûts d'énergie pour les murs non isolés M1 et M2 selon les différentes orientations et pour les toits non isolés T1 et T2.

		C_{en} (DT/m ²)					
Murs	Orientation	M1			M2		
		Été	Hiver	Annuel	Été	Hiver	Annuel
	Est	1,391	1,289	2,680	1,334	1,236	2,570
	Ouest	1,405	1,295	2,701	1,349	1,241	2,590
	Nord	0,892	1,359	2,251	0,857	1,302	2,159
	Sud	1,291	1,117	2,408	1,233	1,072	2,305
		Été		Hiver		Annuel	
Toits	T1	0,664		0,550		1,214	
	T2	2,204		1,822		4,026	

3.2. Effet du choix des matériaux de construction sur l'inertie thermique

Outre la consommation énergétique, le choix des matériaux de construction de l'enveloppe affecte aussi l'inertie thermique donc le confort interne du bâtiment. Nous avons évalué les différentes valeurs du facteur d'amortissement f et du déphasage ϕ des deux murs M1 et M2 pour différentes orientations et pour deux journées représentatives des saisons d'été (21 Juillet) et d'hiver (21 Janvier).

D'après la figure 5, le mur M1 présente, en été comme en hiver et quelle que soit son orientation, des valeurs du facteur d'amortissement plus grandes et des valeurs du déphasage plus petites, comparé au mur M2. En effet, pour l'orientation Est en été (figure 5a), ces valeurs sont $f=17,24\%$ et $\phi=8,5h$ pour le mur M1, contre $f=3,79\%$ et $\phi=15h$ pour le mur M2. Ceci confirme que le mur en pierres M2 présente de meilleures performances d'inertie thermique que le mur en briques M1. Pour les deux murs, l'orientation Est est la plus favorable avec un déphasage qui atteint 15,5h pour le mur en pierres, en hiver. Entre l'été et l'hiver, les différentes orientations présentent presque la même performance d'inertie thermique (mêmes ordres de grandeurs du déphasage et du facteur d'amortissement). Seule l'orientation Sud présente une performance légèrement meilleure en été qu'en hiver. Les mêmes résultats concernant l'orientation des murs externes ont été trouvés par Belhadj et al. [4] pour un climat aride (Laghouat, Algérie).

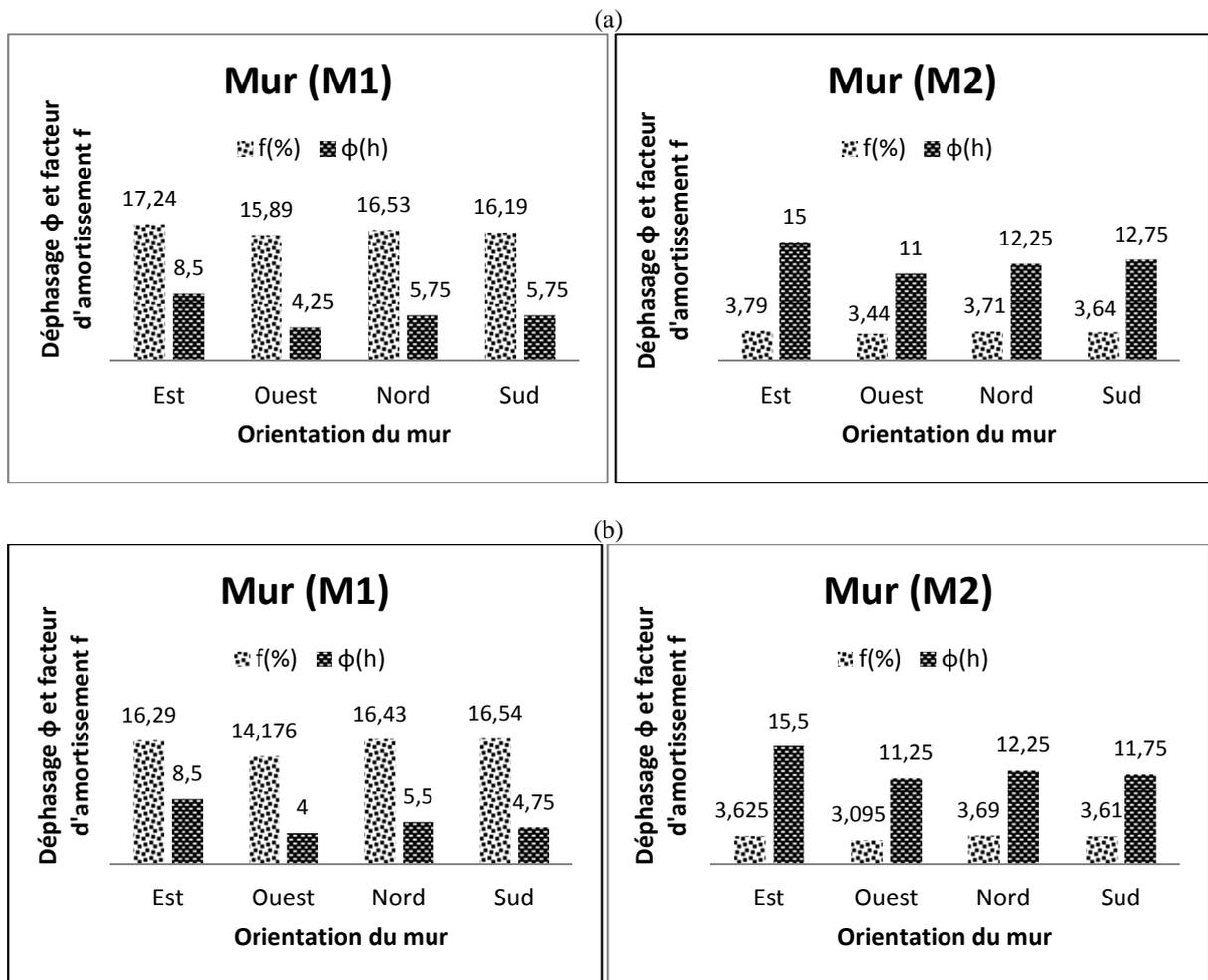


Figure 5 : Effets de la composition et de l'orientation des murs M1 et M2 sur le déphasage et le facteur d'amortissement (a) 21 Juillet (b) 21 Janvier.

Nous avons également évalué les valeurs du facteur d'amortissement f et du déphasage ϕ des deux toitures T1 et T2 et ce, pour deux journées représentatives des saisons d'été (21 Juillet) et d'hiver (21 Janvier).

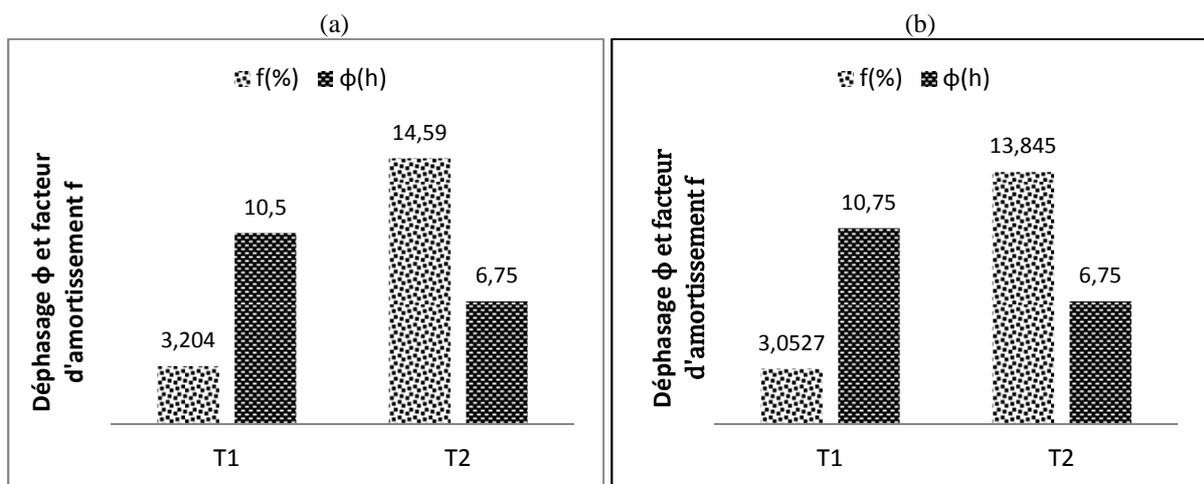


Figure 6 : Effets de la composition de la toiture sur le déphasage et le facteur d'amortissement. (a) 21 Juillet (b) 21 Janvier.

D'après la figure 6, on note une grande différence entre les deux types de toitures en terme d'inertie thermique. En effet, la toiture en terre cuite T1 présente, en été comme en hiver, un facteur d'amortissement plus petit et un déphasage plus grand comparée à la toiture en béton armé T2. Pour T1, ce déphasage atteint 10,75h en hiver, ce qui reflète la capacité de ce toit à fournir un bon confort thermique dans le bâtiment. Une légère amélioration des performances des deux toits est observée en hiver.

4. Comportement thermique des parois isolées

4.1. Effet de l'isolation sur la consommation énergétique annuelle

On considère la structure de mur M11 typiquement utilisée dans les constructions en Tunisie (figure 2c). Il s'agit d'un mur double-cloison en briques avec l'intégration d'une couche d'isolant au milieu. Nous choisissons le polystyrène expansé comme matériau isolant dont l'épaisseur sera variable au cours de l'étude.

La figure (7a) présente les variations du coût de la consommation annuelle d'énergie par rapport à l'épaisseur d'isolation pour différentes orientations du mur. Il est évident que le coût d'énergie diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation. Cette diminution est plus accentuée pour les faibles épaisseurs d'isolation. Les résultats montrent que pour un bilan annuel, le cas le plus économique est l'orientation Nord, suivie par le Sud puis l'Est et l'Ouest qui présentent quasiment la même consommation énergétique. La réduction du coût annuel d'énergie atteint 72,52% pour une isolation modérée de 5 cm de polystyrène expansé placé au milieu d'un mur orienté Ouest. Ces résultats sont en harmonie avec ceux de Daouas [7].

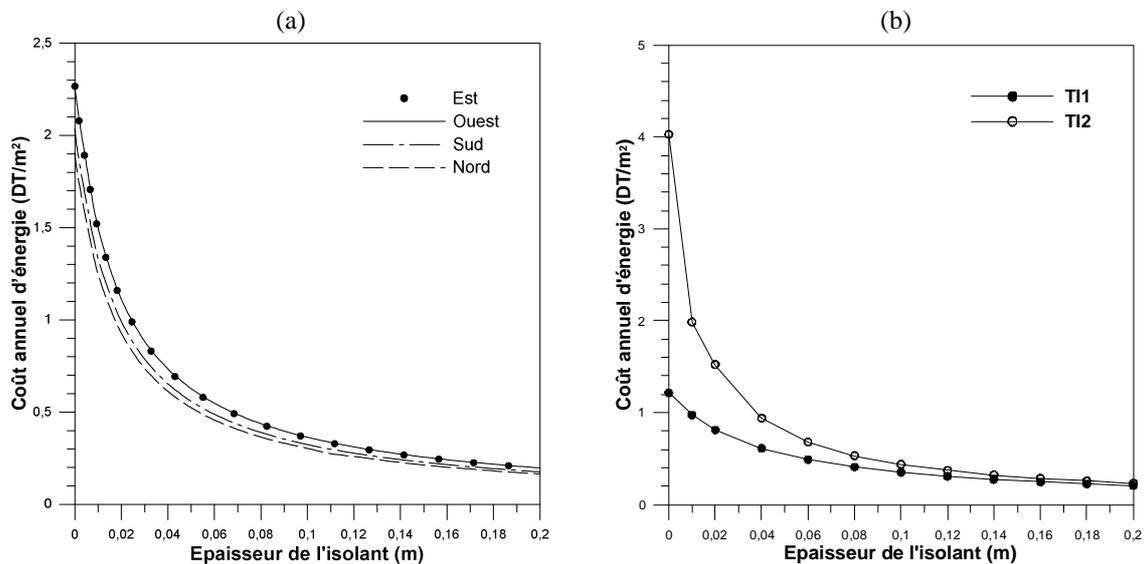


Figure 7 : Effet de l'épaisseur de l'isolant sur le coût annuel d'énergie pour (a) différentes orientations de M11 (b) les toits T11 et T12.

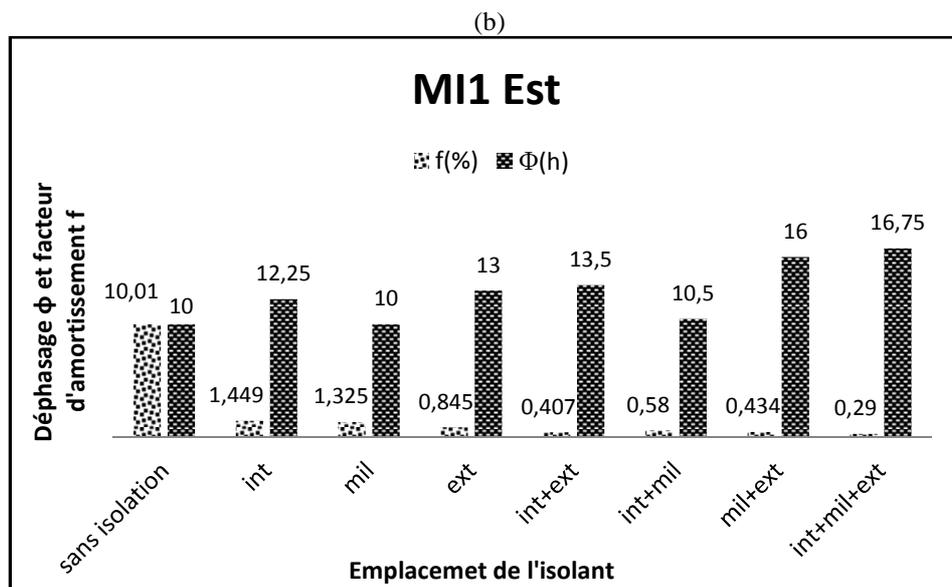
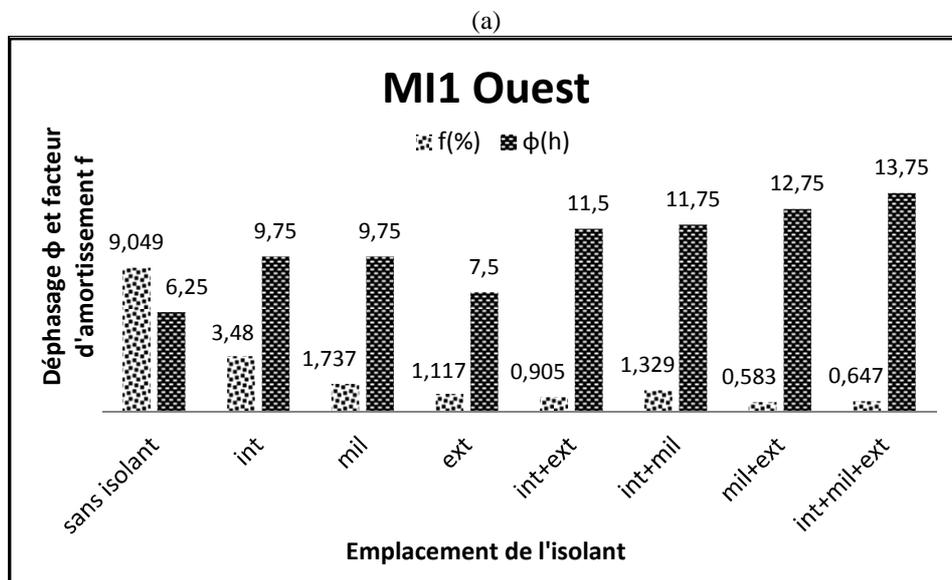
La toiture subit des contraintes climatiques rigoureuses. Elle est l'élément qui reçoit le plus d'irradiation solaire pendant l'été. Ainsi, son isolation est l'une des mesures les plus efficaces dans le contexte climatique du pays. Dans cette étude, nous avons considéré les deux types de structures de toitures couramment utilisées dans les constructions tunisiennes (figure 3) auxquelles est ajoutée une couche d'isolation thermique de polystyrène expansé placée au milieu. On notera T11 la toiture en terre cuite avec isolant et T12 la toiture en béton armé avec isolant. Sur la figure (7b), nous avons étudié l'effet de la variation de l'épaisseur de l'isolant sur le coût annuel d'énergie des deux toits. Il est clair que le toit T11 est meilleur en terme d'économie d'énergie. En effet, ce toit à base de terre cuite présente l'avantage d'être plus léger, d'une part, et d'avoir un pouvoir isolant plus grand, d'une autre part. Pour une isolation modérée de 5 cm de polystyrène expansé placé au milieu de T12, la réduction du coût annuel d'énergie atteint 82,09%.

4.2. Effets de l'emplacement et du nombre des couches d'isolation sur l'inertie thermique

L'isolation thermique vise à limiter les déperditions des logements. Son rôle est de préserver le confort en réduisant les échanges thermiques avec l'ambiance extérieure. Outre le choix de l'épaisseur de l'isolant,

l'emplacement et le nombre des couches d'isolants jouent un rôle important dans le comportement thermique de l'enveloppe vis-à-vis du confort à l'intérieur du bâtiment. En effet, nous avons considéré la possibilité de placer l'isolant de diverses manières dans un mur ou un toit (à l'intérieur, en sandwich, à l'extérieur ou réparti) et étudié l'effet de sa position sur l'inertie de la paroi. L'influence de l'emplacement et du nombre de couches de l'isolant sur le déphasage ϕ et le facteur d'amortissement f a été tout d'abord analysée pour le mur MI1 selon les quatre orientations pendant une journée d'été (figure 8). Dans cette étude, nous avons considéré le cas d'une couche de polystyrène expansé de 5cm d'épaisseur. La même épaisseur sera divisée en deux couches de 2,5 cm chacune ou en 3 couches de 1,66 cm chacune.

D'après les résultats obtenus, les meilleures performances du mur isolé sont obtenues lorsque la couche d'isolant est placée au milieu ou à la surface externe. D'autre part, nous avons montré l'importance de l'emplacement de l'isolant en deux couches séparées. Des valeurs plus élevées du déphasage et des valeurs plus faibles du facteur d'amortissement sont obtenues en plaçant la moitié de l'isolant au milieu et l'autre moitié du côté extérieur du mur. Dans ce cas, l'orientation Est présente les meilleures performances avec un déphasage qui atteint 16 h et un facteur d'amortissement ne dépassant pas 0,44%, contre les valeurs respectives de 10h et 10,01% en l'absence de l'isolant. Une meilleure performance du mur MI1 est obtenue lorsque l'isolation est répartie en trois couches séparées, placées respectivement du côté intérieur, au milieu et du côté extérieur. Pour cette configuration de l'isolation, l'orientation Est est celle qui présente la meilleure performance avec un déphasage qui atteint 16,75h. Sur une base qualitative, ces résultats ont similaires à ceux obtenus par Al-Sanea et Zedan [10] pour des conditions climatiques et des matériaux d'isolation différents.



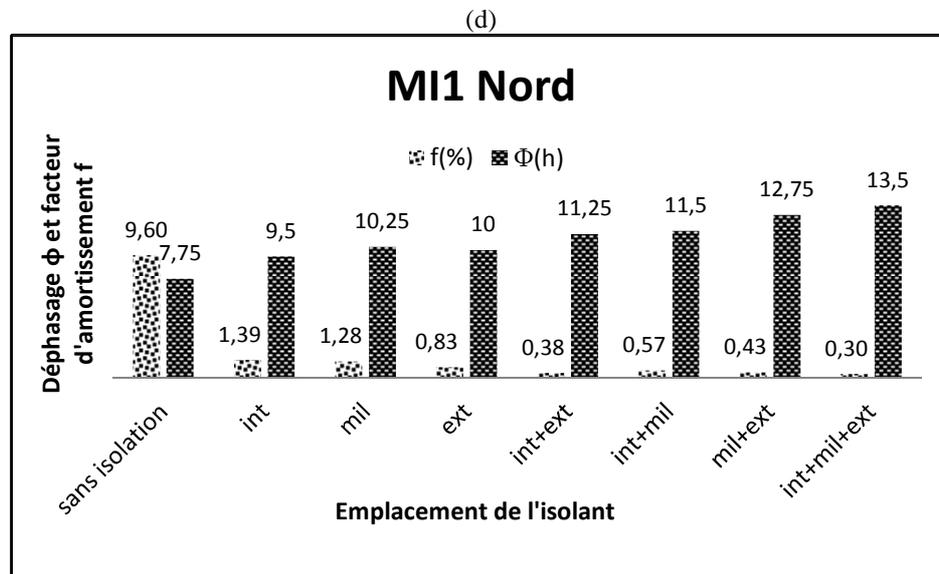
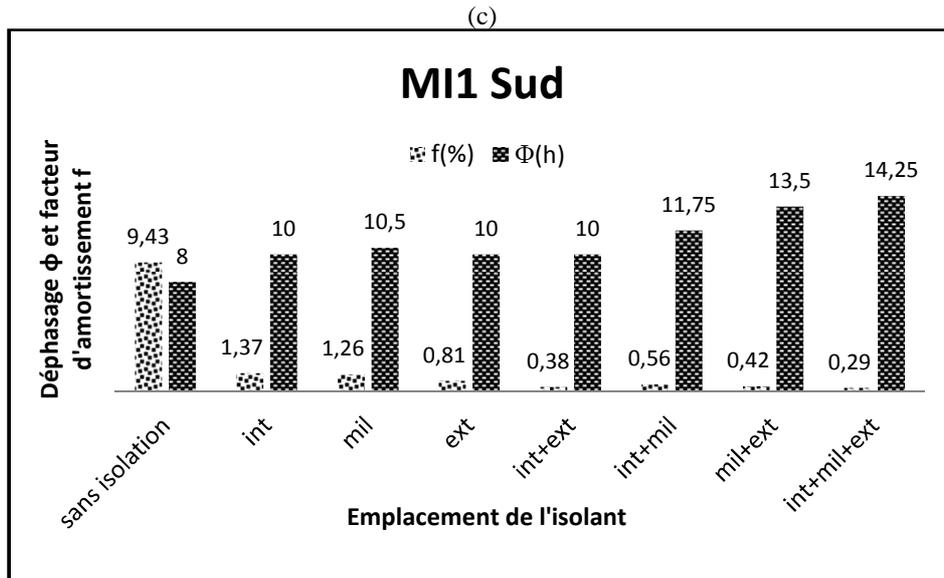


Figure 8: Déphasages et facteurs d'amortissement pour différentes configurations d'isolation pour le mur MI1 orienté (a) Ouest (b) Est (c) Sud (d) Nord. (21 Juillet)

La figure 9 montre les effets de la variation de l'emplacement et du nombre de couches d'isolant sur le facteur d'amortissement et le déphasage pour les toitures TI1 et TI2 en été. D'après les résultats obtenus, une seule couche de polystyrène expansé d'épaisseur 5 cm fournit les meilleures performances lorsqu'elle est placée au milieu (meilleur déphasage) ou à l'extérieur (meilleur facteur d'amortissement) pour les deux toits. D'autre part, nous avons montré l'importance de l'emplacement de l'isolant en deux couches séparées. Des valeurs plus élevées du déphasage et des valeurs plus faibles du facteur d'amortissement sont obtenues en plaçant la moitié de l'isolant au milieu et l'autre moitié du côté extérieur du toit. Dans ce cas, le toit TI1 présente les meilleures performances avec un déphasage qui atteint 17,25 h et un facteur d'amortissement ne dépassant pas 0,08%. Une meilleure performance du toit isolé est obtenue dans le cas où l'isolant est réparti en trois couches de 1.66cm chacune (interne, au milieu et externe). Dans ce cas, on obtient, pour la toiture TI1, $\phi = 17,75\text{h}$ et $f = 0,096\%$ contre $\phi = 10,5\text{ h}$ et $f = 3,204\%$ sans isolant et pour la toiture TI2, $\phi = 14\text{h}$ et $f = 0,17\%$ contre $\phi = 6,75\text{h}$ et $f = 14,598\%$ sans isolant. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par Haddedi et Daouas [19].

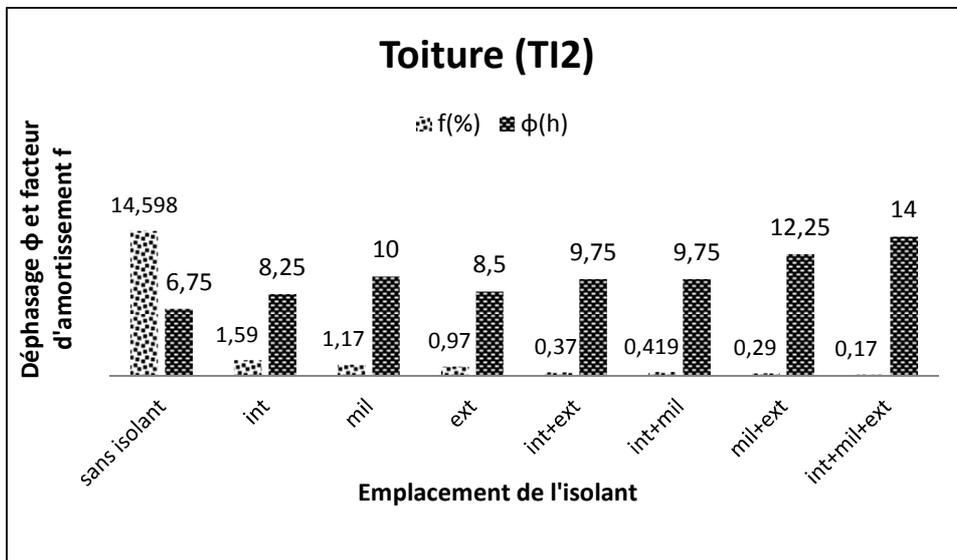
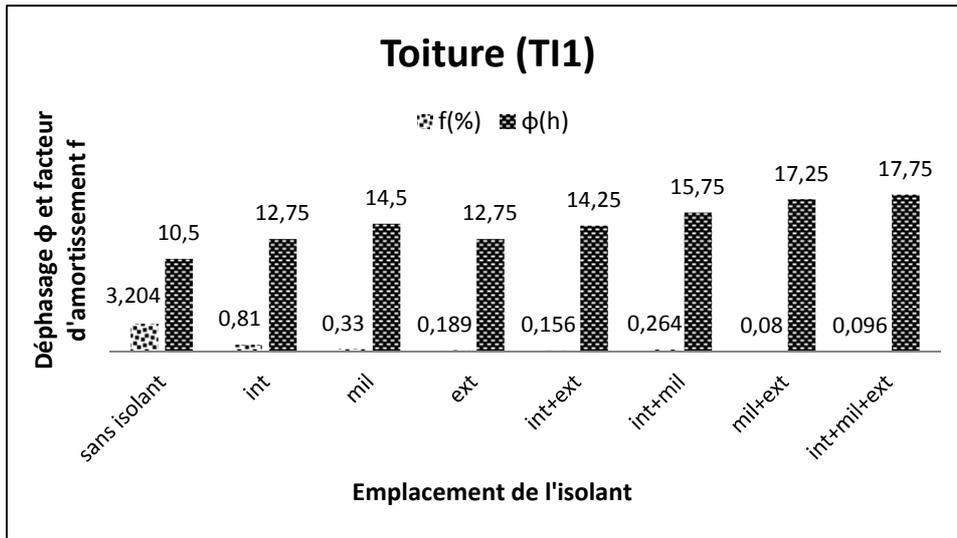


Figure 9 : Déphasages et facteurs d'amortissement pour différentes configurations d'isolation des toitures (21 Juillet).

5. Toits refroidissants

L'utilisation des toits refroidissants constitue une bonne alternative à l'isolation dans le contexte du climat tunisien. Cette technologie, caractérisée par l'augmentation du coefficient de réflexion solaire et de l'émissivité infrarouge du revêtement externe du toit, permettrait de réduire les charges de climatisation l'été, atténuer le réchauffement de l'air ambiant et assurer un meilleur confort dans le bâtiment [20].

L'efficacité des toits refroidissants a été tout d'abord analysée en calculant les coûts annuels d'énergie en fonction de la réflectivité solaire. Nous avons considéré la dalle en béton sans isolation, T2 (figure 10a) puis la même dalle en béton avec une épaisseur d'isolation en polystyrène expansé de 5 cm placée au milieu, T12 (figure 10b). Il est évident que les coûts de chauffage augmentent en hiver, mais cette augmentation est largement compensée par des économies faites pendant l'été sur la climatisation. En effet, on note une diminution des coûts annuels totaux (somme des coûts d'énergie de chauffage et de refroidissement) en fonction de la réflectivité solaire. Pour la toiture non isolée T2 avec une émissivité de surface $\epsilon=0,9$, cette réduction atteint 63,46% suite à l'augmentation du coefficient de réflexion solaire ρ de 0,1 (pour une toiture traditionnelle) à 0,9 (après l'application d'une peinture froide). En comparant les deux courbes de la figure 10, on remarque que l'isolation a réduit d'environ 5 fois le coût d'énergie total.

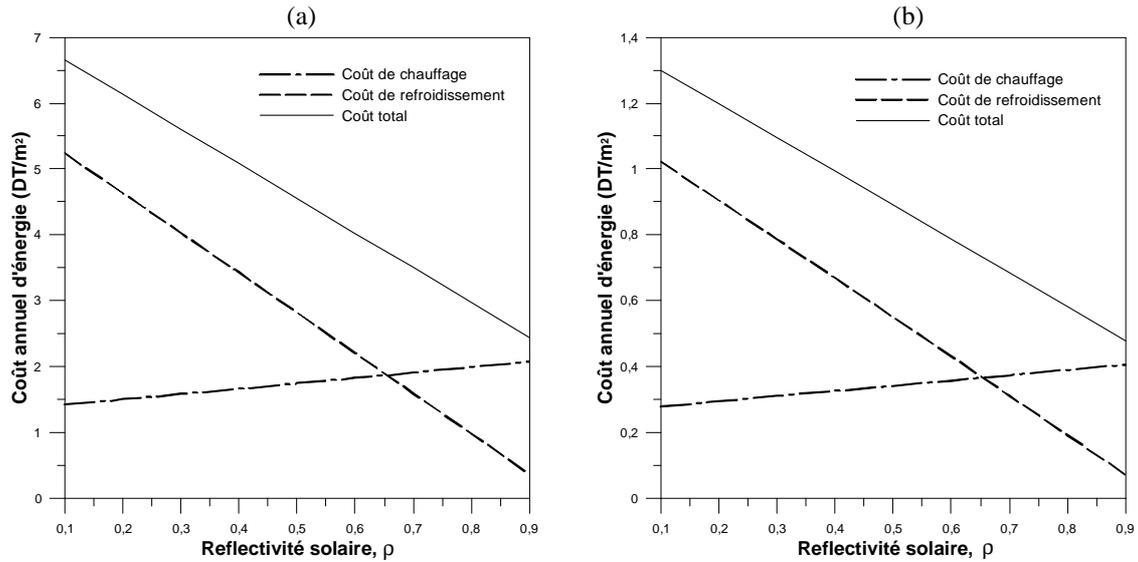


Figure 10 : Effet des toits refroidissants sur le coût annuel d'énergie (a) Modèle T2 (b) Modèle TI2.

La figure 11 montre l'effet des caractéristiques radiatives des toits refroidissants sur la température maximale de la face externe du toit T2 pendant une journée d'été. Une réduction significative de la température maximale est obtenue suite à l'augmentation de la réflectivité solaire de 0,1 à 0,9. cette réduction s'élève à 20,34°C pour une émissivité infrarouge de la surface $\epsilon=0,9$ et à 24,17°C pour $\epsilon=0,1$. La réduction de la température maximale est moins sensible à l'émissivité pour des valeurs plus élevées de la réflectivité. Ainsi, l'utilisation des toits refroidissants peut constituer une bonne alternative à l'isolation en été. Ces résultats sont en harmonie avec ceux de Haddedi et Daouas [19].

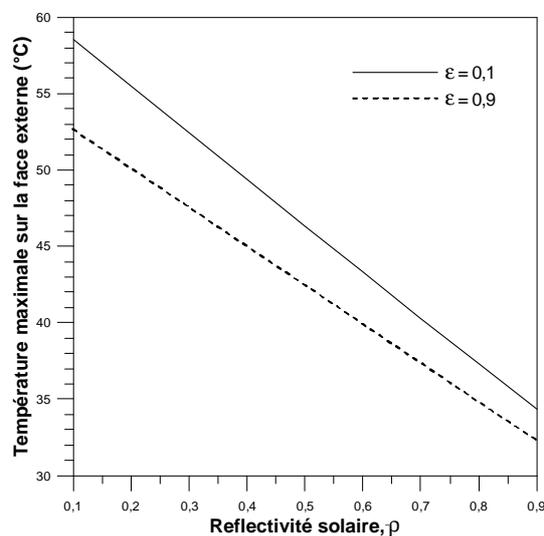


Figure 11: Effets des caractéristiques des toits refroidissants sur la température maximale de la face externe. (21 Juillet)

Pour le toit isolé TI2, nous avons procédé à un calcul des charges annuelles de refroidissement et de chauffage en variant l'épaisseur de l'isolant (polystyrène expansé au milieu) d'une part, et la réflectivité solaire d'une autre part (figure 12). L'objectif étant d'analyser les effets simultanés de l'isolation et de l'application des toits refroidissants sur la consommation énergétique, afin de déterminer une combinaison optimale entre les deux mesures.

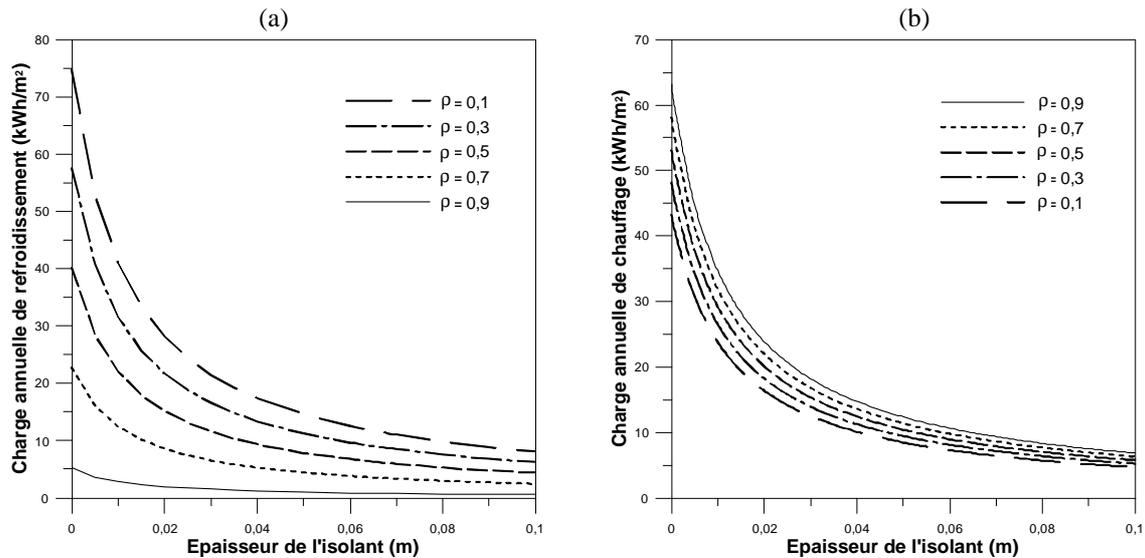


Figure 12 : Effets de l'isolation et des toits refroidissants sur la consommation énergétique annuelle ($\epsilon=0,9$).
(a) charges de refroidissement (b) charges de chauffage.

A travers une analyse de sensibilité des résultats obtenus, nous avons constaté que l'effet du coefficient de réflexion est plus accentué sur les charges de refroidissement que sur les charges de chauffage. En été, la sensibilité de la consommation énergétique vis-à-vis de l'épaisseur d'isolation diminue pour des valeurs élevées de la réflectivité (figure 12a), tandis qu'en hiver, cette sensibilité n'est pas considérablement affectée par la valeur du coefficient de réflexion (figure 12b). Par conséquent, il est fortement recommandé et plus économique dans le contexte du climat tunisien d'utiliser un toit refroidissant avec des coefficients de réflexion et d'émission très élevés, auquel est associé une isolation modérée.

Conclusion

Cette étude est présentée dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité énergétique et des conditions de confort dans le secteur du bâtiment résidentiel en Tunisie. Nous avons focalisé notre travail sur l'analyse du comportement thermique et l'optimisation de l'enveloppe multicouche des bâtiments en adoptant comme outil de simulation le logiciel "EnergyPlus". Dans une première étape, nous avons mis l'accent sur l'impact du choix des matériaux de construction, de l'orientation, de l'isolation thermique et de l'inertie thermique sur la consommation énergétique et le confort interne des bâtiments. Les résultats obtenus ont montré qu'en terme d'économie d'énergie d'une part, et d'inertie thermique d'une autre part, les murs en pierres sont meilleurs comparés aux murs en briques. Pour un bilan annuel, l'orientation Nord est la plus économique, tandis que l'orientation Sud est celle qui présente le plus faible coût d'énergie en hiver. En terme d'inertie thermique, l'orientation Est est la plus favorable avec un déphasage qui atteint 15,5 h pour le mur en pierres. Les toits en terre cuite sont nettement plus économiques que les toits en béton et présentent une meilleure capacité à fournir un bon confort thermique dans le bâtiment.

L'intégration d'un isolant thermique dans l'enveloppe multicouche, a permis une nette réduction du coût annuel d'énergie. En effet, pour une isolation modérée de 5 cm de polystyrène expansé placé au milieu de l'enveloppe, la réduction du coût annuel d'énergie a atteint 72,52% dans le cas du mur en briques orienté Ouest et 82,09% dans le cas du toit en béton. Par ailleurs, nous avons montré que l'emplacement et le nombre des couches d'isolants jouent un rôle important dans le comportement thermique de l'enveloppe vis-à-vis du confort à l'intérieur du bâtiment. D'après les résultats obtenus, des valeurs plus élevées du déphasage et des valeurs plus faibles du facteur d'amortissement sont obtenues en plaçant la moitié de l'isolant au milieu et l'autre moitié du côté extérieur de l'enveloppe. Une meilleure performance de l'enveloppe est obtenue lorsque l'isolation est répartie en trois couches séparées, placées respectivement du côté intérieur, au milieu et du côté extérieur. Dans ce cas, l'orientation Est est celle qui présente la meilleure performance avec un déphasage qui atteint 16,75h et un facteur d'amortissement ne dépassant pas 0,29% pour le mur en briques. Pour cette même configuration d'isolation, c'est le toit en terre cuite qui présente la meilleure performance avec un déphasage qui atteint 17,75h et un facteur d'amortissement ne dépassant pas 0,096%.

L'utilisation des toits refroidissants constitue une bonne alternative à l'isolation dans le contexte du climat tunisien. D'après les résultats obtenus, cette technologie a permis de réaliser d'importantes économies d'énergie

- decrement factor point of view, *Energy and Buildings*, Volume 32, Pages 197-203, 2000.
- [9] M. Ozel, K. Pihili, Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations, *Building and Environment*, Volume 42, Pages 30-51, 2007.
- [10] S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan, Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass, *Applied Energy*, Volume 88, Pages 13-24, 2011.
- [11] N. Fezzioui, B. Draoui, M. Benyamine, S. Larbi, Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud algérien, *Revue des Energies Renouvelables*, Volume 11, Pages 25-34, 2008.
- [12] N. Daouas, Impact of external longwave radiation on optimum insulation thickness in Tunisian building roofs based on a dynamic analytical model, *Applied Energy*, Volume 177, Pages 136-148, 2016.
- [13] A.L. Pisello, V.L. Castaldo, C. Fabiani, F. Cotana, Investigation on the effect of innovative cool tiles on local indoor thermal conditions: Finite element modeling and continuous monitoring, *Building and Environment*, Volume 97, Pages 55-68, 2016.
- [14] P. Ramamurthy, T. Sun, K. Rule, E. Bou-Zeid, The joint influence of albedo and insulation on roof performance: A modeling study, *Energy and Buildings* Volume 102, Pages 317-327, 2015.
- [15] Y. Huang, J. Niu, Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials, *Energy and Buildings*, Volume 117, Pages 387-398, 2016.
- [16] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhlc, Y.J. Huang, C.O. Pedersen, R.K. Strand, R.J. Liesen, D.E. Fisher, M.J. Witte, J. Glazer, EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*, Volume 33, Pages 319-331, 2001.
- [17] C. Luo, B. Moghtaderi, A. Page, Modelling of wall heat transfer using modified conduction transfer function, finite volume and complex Fourier analysis methods, *Energy and Buildings*, Volume 42, Pages 605-617, 2010.
- [18] S. Trachte, A. De Herde, Elaboration d'un outil d'aide à la conception de maisons à très basse consommation d'énergie: choix des matériaux - écobilan de parois. *Rapport externe*, Wallonie 2010.
- [19] I. Haddedi, N. Daouas, Impact de l'isolation des toitures et du concept des toits refroidissants sur le confort thermique et les économies d'énergie dans les bâtiments en Tunisie, *IREEC1: Refrigeration Energy and Environment*, Hammamet, 2016.
- [20] C. Romeo, M. Zinzi, Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study, *Energy and Buildings*, Volume 67 Pages 647-657, 2013.

25-27 Octobre 2017
Monastir - Tunisie