



HAL
open science

Évaluation expérimentale et par simulation des performances thermiques de techniques passives appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments en climat chaud

Salah Kachkouch

► **To cite this version:**

Salah Kachkouch. Évaluation expérimentale et par simulation des performances thermiques de techniques passives appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments en climat chaud. Thermique [physics.class-ph]. Université de La Rochelle; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc), 2018. Français. NNT : 2018LAROS021 . tel-02120781

HAL Id: tel-02120781

<https://theses.hal.science/tel-02120781v1>

Submitted on 6 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Présentée en Cotutelle à l'Université Cadi Ayyad (Maroc) et l'Université de La Rochelle (France) pour obtenir :

LE GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : Thermique et Energétique

ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE ET PAR SIMULATION DES PERFORMANCES THERMIQUES DE TECHNIQUES PASSIVES APPLIQUÉES AUX TOITURES POUR LE RAFRAÎCHISSEMENT DES BÂTIMENTS EN CLIMAT CHAUD

par

SALAH KACHKOUCH

Ingénieur d'Etat en Gestion Technique des Bâtiments

Soutenue le 14 décembre 2018 devant la commission d'examen :

Hassan RADOINE	Professeur PES	Université Mohamed VI Polytechnique, Ben Guerir	Président
Brahim BENHAMOU	Professeur PES	Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech	Directeur de thèse
Karim LIMAM	Maître de Conférences HDR	Université de La Rochelle, France	Co-Directeur de thèse
Stéphane GINESTET	Maître de Conférences HDR	Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, France	Rapporteur
Mustapha EL-ALAMI	Professeur PES	Faculté des Sciences Aïn Chock, Casablanca	Rapporteur
Lahcen BOUKHATTEM	Professeur Habilité	Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Safi	Examineur



**Academy Hassan II
of Sciences and
Techniques**

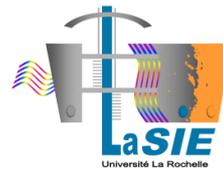
Recherches menées avec le concours de l'Académie Hassan II des
Sciences et Techniques

Dans le cadre du projet RafriBAT 2012

AVANT-PROPOS

Ce travail a été réalisé au sein des laboratoires suivant :

- Laboratoire de Mécanique des Fluides et Énergétique (**LMFE**), Faculté des Sciences Semlalia, l'Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- Laboratoire des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (**EnR2E**) du Centre National d'Études et de Recherche sur l'Eau et l'Énergie – CNEREE – Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (**LaSIE**) de l'Université de La Rochelle, France dans le cadre de la cotutelle à travers le programme de la coopération franco-marocaine PHC Toubkal référence 16-28 (2016-2018).



REMERCIEMENTS

Je remercie très sincèrement toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à cette thèse.

Je tiens tout particulièrement à remercier mes deux directeurs de thèse, Messieurs Brahim BENHAMOU et Karim LIMAM, pour leur encadrement efficace, leur disponibilité et leur soutien. Je vous remercie énormément de m'avoir offert l'opportunité de travailler sur un sujet d'actualité dans de nombreux pays, dont le Maroc et la France.

Je souhaite remercier les membres du projet RafriBAT, Professeurs Hassan HAMDJ, Hassan CHEHOUANI et Abderahim BRAKEZ, pour m'avoir guidé à travers leurs remarques constructives et leurs conseils enrichissants pendant mes états d'avancement.

Je présente mes sincères remerciements à Monsieur Hassan RADOINE, Professeur à l'Université Mohamed VI Polytechnique de Ben Guerir, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Je remercie également Messieurs Stéphane GINESTET, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse et Mustapha EL-ALAMI, Professeur à la Faculté des Sciences Aïn Chock de Casablanca, pour m'avoir fait l'honneur de rapporter ce manuscrit et pour avoir fait partie du jury de ma thèse. Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Lahcen BOUKHATTEM, Professeur à l'ENSA de Safi pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie vivement Madame Laila MANDI, Directrice du Centre National d'Études et de Recherches sur l'Eau et l'Énergie pour sa coopération ainsi que le staff du centre et notamment Dr Fatima AITNOUH pour son accueil chaleureux au sein du CNEREE.

J'adresse mes remerciements à tous mes collègues, doctorants et doctorantes, du CNEREE qui m'ont apporté leur aide dans la mise en place des cellules test, notamment Mourad, Tawfik El Moussaoui, Hassan MAHACH et Hamza BENZAIMA. Je remercie également toutes les personnes qui se sont montrées disponibles pour m'orienter durant mes séjours au LaSIE.

Je tiens bien évidemment à présenter mes vifs remerciements et mon immense gratitude à mes parents Abdeslam et Souad, mes sœurs Warda, Rim et Fatima Zahraa qui m'ont toujours encouragé durant cette thèse. C'est bien grâce à Dieu et à vous que j'ai pu réaliser ce rêve... de devenir Docteur.

Et je termine ces remerciements avec une pensée à ma grand-mère qui nous a quittés en Juin 2016.

TABLE DES MATIÈRES

NOMENCLATURE.....	1
ABRÉVIATIONS	4
RÉSUMÉ.....	5
ABSTRACT	7
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	9
CHAPITRE I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET ÉTAT DE L'ART	13
I.1. Problématique	14
I.2. Les principes du rafraîchissement passif.....	14
I.3. Techniques de rafraîchissement passif ou semi-passif de l'air dans les bâtiments	15
I.3.1. Techniques passives appliquées aux toitures	15
I.3.2. Autres techniques passives et semi-passives de rafraîchissement de l'air dans les bâtiments .	23
I.4. Construction à base de matériaux naturels et enjeux du développement durable	24
I.4.1. Construction en pisé.....	24
I.4.2. Isolants naturels.....	26
I.5. Généralités sur le confort thermique dans les bâtiments.....	27
I.6. Conclusion	29
CHAPITRE II. MÉTHODOLOGIE DES PROCÉDURES EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE	30
II.1. Introduction.....	31
II.2. Approche expérimentale	31
II.2.1. Etude expérimentale en modèle réduit.....	31
II.2.1.1. Description des cellules test utilisées.....	31
II.2.1.2. Systèmes de mesure	34
II.2.1.3. Études préliminaires	36
II.2.2. Etude expérimentale en bâtiment réel.....	38
II.2.2.1. Description du bâtiment étudié	39
II.2.2.2. Méthodologie utilisée pour le monitoring.....	40
II.3. Approche numérique	41
II.3.1. Modélisation du bâtiment sur TRNSYS	41
II.3.2. Hypothèses de simulation	42
II.3.2.1. Données météorologiques.....	42
II.3.2.2. Température et propriétés thermophysiques du sol	43

II.3.2.3. Caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment	43
II.3.2.4. Gains internes	44
II.3.2.5. Autres hypothèses adoptées dans la simulation	44
II.4. Conclusion	45
CHAPITRE III. ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE EN MODÈLE RÉDUIT	46
III.1. Introduction	47
III.2. Description des techniques passives choisies	47
III.3. Contexte géographique et climatique	49
III.4. Résultats	51
III.4.1. Analyse de la température de l'air à l'intérieur des cellules de test.....	51
III.4.2. Analyse de la température des surfaces de la dalle des cellules test	55
III.4.3. Analyse des flux de chaleur à travers la dalle des cellules test	60
III.5. Etude comparative du comportement thermique de deux isolants naturels	62
III.5.1. Méthodologie.....	62
III.5.2. Résultats de l'étude	63
III.6. Conclusion.....	64
CHAPITRE IV. ÉVALUATION PAR LA SIMULATION SUR UN BÂTIMENT EN MATERIAUX BIOSOURCÉS	67
IV.1. Introduction	68
IV.2. Validation du modèle numérique	68
IV.3. Evaluation du comportement thermique des murs en pisé.....	71
IV.4. Etude comparative de quelques configurations de toit.....	75
IV.4.1. Description des configurations étudiées.....	76
IV.4.2. Analyse des températures de plafond.....	77
IV.4.3. Analyse des heures d'inconfort et des consommations énergétiques.....	82
IV.4.4. Comparaison avec le Règlement thermique de construction Marocain	83
IV.4.4.1. Approche prescriptive	84
IV.4.4.2. Approche performancielle.....	85
IV.5. Conclusion.....	86
CONCLUSION GÉNÉRALE	87
RÉFÉRENCES.....	91
ANNEXES	100
1. ANNEXE I : Description du logiciel TRNSYS	100
2. ANNEXE II : Description mathématique des Types utilisés sur TRNSYS	101

2.1. Type 56 (TRNBUILD)	101
2.2. Type 33 (Psychrométrie)	107
2.3. Type 69 (Température effective du ciel)	107
2.4. Type 99 (Lecteur des fichiers météorologiques)	108
2.5. Type 77 (Température de sol)	109
2.6. Type 65 (Traceur en ligne)	109

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité
A	Surface	m ²
C _{Cover}	Facteur de nébulosité du ciel (0 à 1)	-
C _i	Chaleur massique de la zone i	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
C _p	Chaleur massique d'un matériau	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Depth	Profondeur sous la surface du sol	m
E _{dif, h}	Rayonnement diffus sur l'horizontal	W.m ⁻²
E _{glob, h}	Rayonnement total sur l'horizontal	W.m ⁻²
e _i	Épaisseur du matériau « i » constituant la paroi	m
f _{s,sky}	Facteur de vue du ciel (0.5 pour les surfaces verticales et 1 pour les surfaces horizontales)	-
h et h _c	Coefficient de transfert de chaleur par convection	W.m ⁻² .K ⁻¹
h _r	Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement	W.m ⁻² .K ⁻¹
I ou I _T	Irradiation solaire globale sur un plan horizontal	W.m ⁻²
I _b	Irradiation solaire directe sur un plan horizontal	W.m ⁻²
I _d	Irradiation solaire diffuse sur un plan horizontal	W.m ⁻²
k _T	Ratio du rayonnement solaire global sur une surface horizontale par rapport au rayonnement extraterrestre	-
n _a , n _b , n _c , n _d	Nombre des coefficients a _s , b _s , c _s et d _s	-
P _i	Charge thermique de la zone i (négative pour le chauffage, positive pour le refroidissement)	W
P _{atm}	Pression atmosphérique	Pa
P ₀	Pression atmosphérique à la hauteur de référence	Pa
Q̇ ₁	Flux de chaleur nets	W
Q̇ _{surf}	Flux convectifs provenant des parois intérieures	W
Q̇ _{inf}	Flux d'infiltration	W
Q̇ _{vent}	Flux de ventilation	W
Q̇ _{g,c}	Flux convectifs internes (par les occupants, par les équipements, par l'éclairage, etc.)	W
Q̇ _{cplg}	Flux convectifs dus à l'écoulement de l'air entre les zones	W
Q̇ _{solar}	Flux solaires entrant dans une zone à travers les fenêtres externes et qui sont immédiatement transférés en gain convectif à l'air intérieur	W
Q̇ _{ISHCCI}	Rayonnements solaires absorbés par les dispositifs d'ombrage internes de la zone, qui sont directement transférés comme un gain convectif à l'air intérieur	W
Q̇ _{r,w_i}	Flux radiatifs par le nœud surfacique du mur	W

\dot{Q}_{g,r,w_i}	Flux radiatifs internes reçus par le mur	W
\dot{Q}_{sol,w_i}	Flux solaires reçus par le mur via les fenêtres	W
\dot{Q}_{long,w_i}	Flux à travers les échanges de chaleur par rayonnement entre un mur et les autres murs de la zone	W
$\dot{Q}_{wall-gain}$	Flux de chaleur radiatif spécifique à un mur donné	W
$\dot{q}_{r,s,i}$	Flux net radiatif à grande longueur d'onde échangé avec toutes les autres surfaces de la zone	W
$\dot{q}_{r,s,o}$	Flux net radiatif échangé avec toutes les surfaces extérieures à la zone	W
$\dot{q}_{w,g,i}$	Flux dans la paroi ou dans la surface de la fenêtre définis par l'utilisateur	W
$\dot{q}_{s,i}$	Flux conductif dans le mur vers la surface interne	W
$\dot{q}_{s,o}$	Flux conductif dans le mur à partir de la surface externe	W
$\dot{q}_{c,s,i}$	Flux convectif à partir de la surface interne du mur vers l'air de la zone	W
$\dot{q}_{c,s,o}$	Flux convectif à partir de la surface externe du mur vers l'air ambiant	W
Q_c	Charge totale de chauffage du bâtiment	Wh
Q_r	Charge totale de refroidissement du bâtiment	Wh
R	Résistance thermique d'une paroi	$W.m^{-2}.K^{-1}$
RH	Humidité relative de l'air	%
R_b et R_d	Facteur géométrique	-
$S_{s,i}$	Rayonnement à courte longueur d'onde absorbé par la surface intérieure (gains solaires et radiatifs)	$W.m^{-2}$
$S_{s,o}$	Rayonnement à courte longueur d'onde absorbé par la surface extérieure (gains solaires)	$W.m^{-2}$
T_{paroi}	Température de surface d'une paroi	K
T_{amb}, T_{air}	Température de l'air ambiant	K
T_{int}	Température (mesurée) de l'air intérieur	°C
T_{SI}	Température (mesurée) de la surface interne du toit	°C
T_{SO}	Température (mesurée) de la surface externe du toit	°C
$T_{ext,i}$	Température extérieure	K
$T_{vent,i}$	Température de l'air provenant des équipements de ventilation	K
$T_{zone,i}$ et T_i	Température de la zone i	K
$T_{f,sky}$	Température fictive du ciel	K
T_{sky}	Température du ciel	K
$T_{s,ground}$	Température du sol	K
T_{mean}	Température moyenne annuelle de la surface du sol	K
T_{amp}	Amplitude de la température de la surface du sol	K

	(température maximale moins la température moyenne de l'air)	
$T_{s,i}$	Température de la surface interne du mur	K
$T_{s,o}$	Température de la surface externe du mur	K
T_{op}	Température opérative	K
T_{sat}	Température de saturation	K
t_{now}	Jour courant de l'année	jour
t_{shift}	Jour de l'année correspondant à la température minimale de la surface du sol	jour
ΔT	Différence de températures	°C
U et U_w	Coefficient de transmission thermique	$W.m^{-2}.K^{-1}$
V	Vitesse du vent	$m.s^{-1}$
\dot{V}	Débit volumique	$m^3.s^{-1}$
\emptyset_{GLO}	Échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde	W
Autres		
λ	Conductivité thermique d'un matériau	$W.m^{-1}.K^{-1}$
ρ_g	Réflexivité du sol	$W.m^{-2}$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-4}$
ε	Émissivité thermique d'une surface	-
ρ	Masse volumique d'un matériau	$kg.m^{-3}$
ρ_0	Masse volumique de l'air	$kg.m^{-3}$
α	Diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
α_a	Angle d'altitude solaire	°
θ	Angle d'incidence du rayonnement solaire direct sur une surface	°
θ_z	Angle de zénith solaire	°
β	Angle d'inclinaison d'une surface	°
γ	Angle d'azimut d'une surface	°
γ_z	Angle d'azimut solaire	°
λ_0	Longueur d'onde	m

ABRÉVIATIONS

Symboles	Définition
AMEE	Agence marocaine pour l'efficacité énergétique
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CLO	Courtes longueurs d'ondes
CNEREE	Centre national d'études et de recherches sur l'eau et l'énergie
EnR2E	Laboratoire des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique
EPS	Polystyrène expansé
FPD	Fibres de palmier dattier
GES	Gaz à effet de serre
GLO	Grandes longueurs d'ondes
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
ONEE	Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable au Maroc
PMR	Produit minces réfléchissants
REF	Référence
RT	Réglementation thermique française
RTCM	Règlement thermique de construction au Maroc
SH	Ombrage
STD	Simulation thermique dynamique
TMY	Typical meteorological year
TPF	TRNSYS project file
TRNSYS	Transient system simulations
WP	Peinture blanche

RÉSUMÉ

Le bâtiment est l'un des secteurs les plus consommateurs d'énergie et producteurs de CO₂ au monde. Au Maroc, ce secteur représente actuellement 33% de la consommation totale à l'échelle nationale. Le nouvel règlement thermique au Maroc vise à introduire des pratiques éco énergétiques dans ce secteur pour réduire ces consommations. En effet, dans la région méditerranéenne, l'architecture du bâtiment a un impact primordial sur sa performance énergétique et thermique. Par ailleurs, l'intégration des techniques passives et l'utilisation des matériaux locaux pourraient réduire considérablement la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. C'est dans ce contexte où se situe cette thèse de Doctorat et dont l'objectif est d'évaluer la capacité de rafraîchissement de quelques techniques passives pour la protection solaire des toitures et de montrer l'importance de l'utilisation des matériaux naturels locaux dans le climat chaud et semi-aride de Marrakech.

En effet, trois techniques passives appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments sont testées dans des conditions climatiques réelles de la ville de Marrakech. Ces techniques, à savoir la peinture blanche, l'ombrage et l'isolation thermique, sont appliquées aux toitures de trois cellules test placées à l'extérieur. Les performances thermiques de ces techniques sont évaluées simultanément via un monitoring de 29 jours d'été de quatre cellules test identiques, dont une cellule test de référence à toit nu (sans traitement). Les mesures ont concerné la température de l'air à l'intérieur des cellules test, la température du plafond et la température de la surface extérieure du toit, ainsi que le flux de chaleur qui traverse le toit. De plus, tous les paramètres climatiques locaux ont été enregistrés au moyen d'une station météorologique installée à proximité des cellules test. Les résultats montrent que les techniques passives étudiées ont un impact significatif sur le flux de chaleur à travers le toit et par conséquent sur le plafond des cellules test (surface intérieure du toit) et la température de l'air intérieur. La toiture peinte en blanc a la performance thermique la plus élevée car elle abaisse la température du plafond jusqu'à 13°C par rapport à la cellule test de référence; alors que la réduction de cette température est inférieure à 9,9°C et 8,9°C respectivement pour le toit isolé thermiquement par 4 cm de polystyrène expansé et le toit ombragé. En outre, le toit peint en blanc réduit le flux de chaleur à travers le toit jusqu'à 66% par rapport à un toit nu.

Les cellules test à échelle réduit nous ont permis de comprendre le comportement thermique des techniques passives étudiées en été. Celles-ci ont été appliquées, par la suite, à la toiture d'un bâtiment réel pour évaluer la plus-value qu'apportent ces techniques. Ce bâtiment représente une salle de classe dont les murs sont construits en pisé stabilisé. L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité des murs massifs en pisé et des techniques passives intégrées au toit, à améliorer le comportement thermique et la performance énergétique du bâtiment avec et sans occupation. À cette fin, un suivi à long terme du bâtiment a été effectué en été et en hiver pour concevoir et valider un modèle numérique du bâtiment étudié sur le logiciel TRNSYS. Les résultats expérimentaux montrent que la température de l'air intérieur est remarquablement stable alors que l'amplitude de la température de l'air extérieur a atteint 20°C. Les charges annuelles de chauffage et de refroidissement du bâtiment réel sans occupation sont atténuées respectivement de 21% et 44% par rapport à un bâtiment de

référence équivalent et dont les murs sont construits en parpaing. Les résultats montrent également que les techniques passives appliquées au toit du bâtiment permettent de réduire les heures d'inconfort thermique d'environ 7% par rapport à la configuration où le toit est nu. Ainsi, les consommations énergétiques sont réduites de 28%. Une comparaison entre les caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment étudié et celles exigées par le Règlement Thermique de Construction Marocain a montré que le matériau de pisé, à grande inertie thermique, n'est pas pris en considération dans l'approche prescriptive du RTCM et qu'il est nécessaire de réaliser de vérifier sa conformité au RTCM par des simulations thermiques (approche performancielle).

Mots clés : Techniques passives, Etude expérimentale, Cellule test, Matériaux locaux, Simulation thermique dynamique, Etude paramétrique, Inertie thermique, Efficacité énergétique, Toiture.

ABSTRACT

The building is one of the most energy-consuming and CO₂-producing sectors in the world. Nowadays, this sector accounts for 33% of total energy consumption in Morocco. The new thermal regulation in Morocco aims to introduce eco-energy practices in this sector to reduce this consumption. Indeed, in the Mediterranean region, building architecture has a major impact on its energy and thermal performance. In addition, the integration of passive techniques and the use of local materials could significantly reduce energy consumption in the building sector. In this context where this thesis is located and whose objective is to evaluate the cooling capacity of some passive techniques for the solar protection of roofs and to show the importance of the use of local natural materials in the hot and semi-arid climate of Marrakech.

Indeed, three passive cooling techniques are tested in real conditions in the Marrakech region. Passive techniques, namely white paint, shading and thermal insulation, are applied to the roofs of three outside test cells. The thermal performances of these techniques are evaluated simultaneously via a 29-day summer monitoring of four identical test cells, including a bare roof reference test cell (without treatment). The measurements concerned the indoor air temperature of the test cells, the ceiling temperature and the temperature of the external surface of the roof, as well as the heat flux through the roof. In addition, all local climatic parameters were recorded by means of a weather station installed near the test cells. The results show that the passive techniques studied have a significant impact on the heat flux through the roof and consequently on the ceiling of the test cells and the indoor air temperature. The white painted roof has the highest thermal performance because it lowers the ceiling temperature up to 13°C compared to the reference test cell; while the reduction of this temperature is lower than 9,9°C and 8,9°C respectively for the thermally insulated roof with 4 cm of expanded polystyrene and the shaded roof. In addition, the white painted roof reduces heat flux through the roof up to 66% compared to a bare roof.

The reduced-scale test cells made it possible to understand the thermal behavior of the passive techniques studied in summer. These were subsequently applied to the roof of a real building to assess the added value of these techniques. This building represents a classroom whose walls are built of stabilized rammed earth. The objective of this study is to evaluate the capacity of massive rammed earth walls and passive techniques integrated into the roof, to improve the thermal behavior and energy performance of the building with and without occupancy. To this end, a long-term monitoring of the building was carried out in summer and winter to design and validate a digital model of the studied building on the TRNSYS software. Experimental results show that the temperature of the indoor air is remarkably stable while the amplitude of the outside air temperature has reached 20°C. The annual heating and cooling loads of the real building without occupancy are reduced by 21% and 44% respectively compared to an equivalent reference building whose walls are constructed of concrete block. The results also show that the passive techniques applied to the roof of the building reduce the hours of thermal discomfort by about 7% compared to the configuration where the roof is bare. Thus, energy loads is reduced by 28%. A comparison between the

thermal characteristics of the studied building's envelope and those required by the Moroccan Construction Thermal Regulation (RTCM) has shown that the rammed earth material, with high thermal inertia, is not taken into account in the prescriptive approach of the RTCM and that it is necessary to verify its compliance with the RTCM by thermal simulations (performancial approach).

Keywords: Passive cooling techniques, Experimental study, Test cells, Local materials, Dynamic thermal simulation, Parametric study, Thermal inertia, Energy efficiency, Roof.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le Maroc est parmi les pays les moins dotés de ressources énergétiques fossiles. En effet, il est confronté à des fortes contraintes énergétiques en raison de sa quasi-dépendance de l'étranger (environ 94% en 2013) pour son approvisionnement en énergie [IEA, 2014]. Ce problème a toujours impacté l'économie marocaine et plus particulièrement la caisse de compensation qui a subventionné le prix des carburants jusqu'à 2014. Pour faire face à ce problème, le Maroc a élaboré des vastes programmes visant à réduire sa dépendance énergétique à 82% en 2030¹ par le biais de la promotion des énergies renouvelables et la mise en place d'une stratégie nationale de l'efficacité énergétique.

Selon l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable, l'énergie électrique nette appelée a atteint 37216 GWh en fin 2017, en enregistrant un taux de croissance de 5,1% par rapport à l'année 2016 [ONEE, 2018]. D'autre part, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) représentait environ 28% de la consommation totale d'énergie au Maroc en 2014 (figure 1). Il s'agit également du secteur responsable des changements climatiques puisqu'il est la cause de plus d'un tiers des émissions des gaz à effet de serre [IEA, 2014]. Ces chiffres ont tendance à augmenter en raison du développement industriel et urbain ce qui oblige l'ONEE à produire davantage en électricité pour satisfaire la forte demande. La production d'électricité a augmenté en moyenne de 6% par an entre 2002 et 2012, aboutissant à 27,3 TWh d'électricité générée en 2012 dont le charbon constitue la source de production majeure (43,4 % de la production électrique nationale) [IEA, 2014]. Par conséquent, le secteur du bâtiment au Maroc passe à 33% de la consommation totale nationale au moment de l'écriture de ces lignes, d'après la direction de la qualité et des affaires techniques au sein du ministère de l'Aménagement du territoire national, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Politique de la ville².

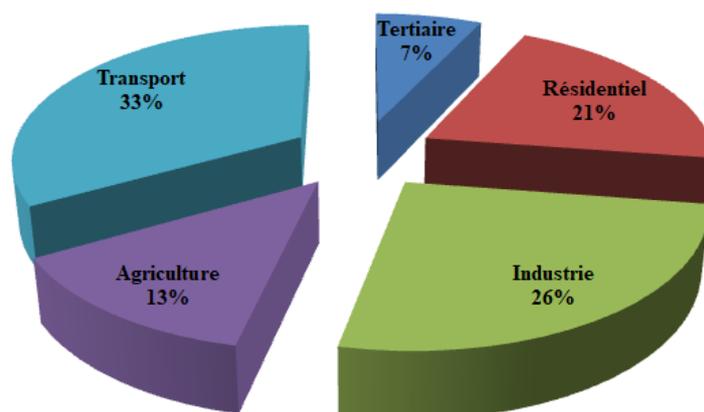


Figure 1. Structure de la consommation énergétique nationale par secteur [IEA, 2014]

¹ <https://www.leconomiste.com/article/1024361-dependance-energetique-les-chantiers-en-cours-et-ceux-venir>. Consulté le 13-09-2018.

² <https://boursenews.fnh.ma/article/actualite/le-secteur-du-batiment-residentiel-et-tertiaire-represente-33-de-la-consommation-totale-d-energie-au-maroc>. Consulté le 13-09-2018.

Par ailleurs, l'efficacité énergétique est devenue l'un des grands enjeux économiques et environnementaux, notamment dans le secteur du bâtiment. Dans ce contexte, le Maroc a élaboré une nouvelle stratégie énergétique visant à alléger la consommation énergétique qui s'est concrétisée par l'adoption de la loi 47-09 [Loi 47-09, 2015]. Cette dernière a fixé une feuille de route dont les objectifs arrêtés portent sur l'économie de 15% de la consommation énergétique à l'horizon de 2030. Dans cette perspective, l'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique (AMEE) a mis en place une réglementation thermique dans le bâtiment afin d'instaurer un cadre normatif qui vise à introduire des exigences minimales que doivent respecter les bâtiments neufs en vue d'optimiser leurs besoins en chauffage et en refroidissement tout en améliorant leur confort thermique [AMEE, 2017]. Ces exigences dépendent du type d'usage de bâtiment, de la zone climatique et du taux global des baies vitrées [RTCM, 2014]. Il convient de noter que la réduction des besoins énergétiques annuels dans le secteur du bâtiment peut être assurée par l'intégration des techniques passives ou semi-passives permettant d'augmenter les performances thermique et énergétique dans ce secteur dit énérgivore. Ces techniques sont directement liées aux matériaux de construction et à l'architecture du bâtiment [Santamouris et al, 2007].

En outre, le secteur du bâtiment présente un grand potentiel en matière du développement durable. En effet, le choix des matériaux de construction a un impact primordial sur l'épuisement des ressources naturelles, la consommation d'énergie et les émissions des GES et des déchets. Cependant, l'utilisation des matériaux locaux et naturels favorise le savoir-faire de l'homme et évite son remplacement par des systèmes industriels, ce qui met en avant le côté social. De plus, ces matériaux sont connus par leur faible consommation d'énergie grise et de transport ainsi que par leur durabilité et leur capacité de réutilisation à la fin de la durée de vie du bâtiment. De nos jours, ces matériaux sont de moins en moins utilisés dans la construction des bâtiments en milieu rural marocain. Le gouvernement lui-même a construit un grand nombre de salles de classe dans ce milieu en vue de généraliser l'accès à l'enseignement. La majorité de ces salles de classe sont construites en préfabriqué du fait de sa rapidité dans la mise en œuvre ou en matériaux conventionnels (béton) qui sont très coûteux en production et en transport. Ces façons de faire produisent des classes inconfortables en été comme en hiver et inadaptées.

Cette thèse s'inscrit parfaitement dans le cadre de la stratégie d'efficacité énergétique qui vise à réduire la consommation énergétique dans les bâtiments tout en améliorant leur confort thermique. Elle consiste à étudier trois techniques de rafraîchissement passif (toit peint blanc, toit ombragé et toit isolé thermiquement) dans des conditions climatiques réelles. Ces techniques sont relativement liées à la protection solaire des toitures qui contribuent en grande partie à l'accumulation de la chaleur dans un bâtiment et notamment dans une région telle que Marrakech là où l'irradiation solaire est très élevée (entre 5 et 5,3 kWh/m²/jour) avec plus de 3000 h/an d'ensoleillement (figure 2) [SIEM, 2017].

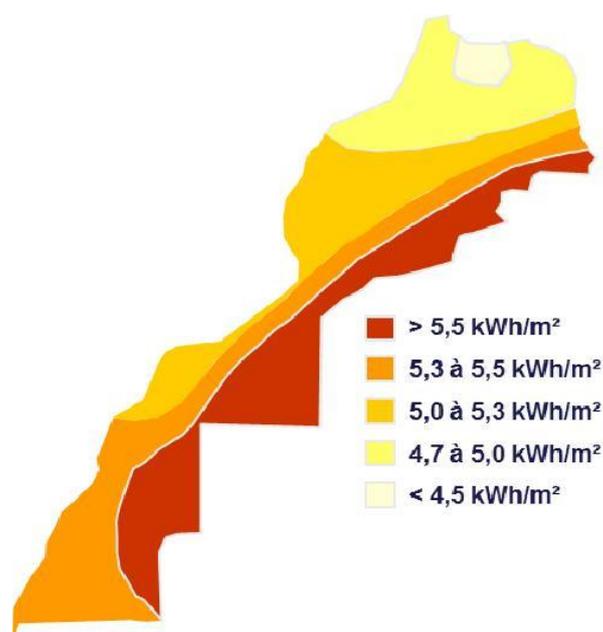


Figure 2. Gisement solaire au Maroc [SIEM, 2017]

Ce manuscrit de thèse est composé de quatre chapitres principaux. Les principes de rafraîchissement passif ou semi-passif de l'air dans le bâtiment sont abordés au début du premier chapitre. Ce dernier est consacré à l'étude bibliographique et l'état de l'art des différentes études liées à la problématique de l'amélioration de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment sous différents climats. Ce chapitre présente les différentes techniques passives ou semi-passives appliquées aux toitures ainsi que les stratégies bioclimatiques et plus particulièrement l'utilisation des matériaux de construction locaux et naturels. En fin de ce chapitre, quelques notions sur le confort thermique dans les bâtiments sont présentées.

Le deuxième chapitre définit les approches envisagées pour atteindre l'objectif de cette thèse. Il présente les protocoles expérimentaux suivis pour l'évaluation de trois techniques passives de rafraîchissement de l'air dans le bâtiment dans un climat chaud et semi-aride à la fois en cellules test à échelle réduite et en bâtiment réel. La méthodologie suivie consiste à évaluer simultanément, via un monitoring en été, le comportement thermique de trois cellules test identiques (à échelle réduite) dont les toits sont équipés avec les trois techniques passives étudiées, et le comparer avec celui d'une quatrième cellule test identique et à toit nu (cellule de référence). Par la suite, une étude paramétrique des techniques étudiées en premier lieu sur les modèles réduits, sera menée sur un prototype à l'échelle 1 de salle de classe construite en matériaux biosourcés (non-industriels). Ces matériaux sont issus de matières premières renouvelables (roseaux) et recyclables (terre). Une présentation détaillée des prototypes, utilisés pour l'étude expérimentale, est réalisée. Ce chapitre présente également l'approche numérique basée sur des simulations thermiques dynamiques du bâtiment étudié sous le logiciel TRNSYS (TRansient SYstem Simulations). La description de ce dernier, ses composants mathématiques ainsi que les hypothèses adoptées lors de la modélisation est présentée dans les annexes de ce manuscrit.

Le troisième chapitre est réservé pour présenter l'étude comparative du comportement thermique de chacune des trois techniques passives intégrées aux toits des cellules test instrumentées en été. Les relevés des capteurs installés dans les trois cellules test sont présentés et comparés à ceux de la cellule test de référence dont le toit est nu ; à savoir les températures de l'air intérieur, les températures du plafond (surface intérieure du toit), les températures surfaciques extérieures et les flux de chaleur traversant les toits.

Enfin, le quatrième chapitre qui concernera le bâtiment réel (échelle 1) nous permettra d'étudier à la fois le comportement thermique et énergétique des murs massifs en pisé stabilisé (5% du ciment) et de chacune des techniques passives de protection solaire du toit étudiées dans le chapitre 3, et ceci par le biais des simulations thermiques dynamiques qui seront menées sous l'environnement TRNSYS. Une comparaison entre les résultats des simulations et ceux du monitoring est présentée. Celle-ci a permis de calibrer le modèle numérique du bâtiment. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des résultats de l'étude paramétrique sur les différentes configurations de toit ainsi qu'à la comparaison du bâtiment étudié au RTCM selon les approches prescriptive et performancielle.

CHAPITRE I.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET ÉTAT DE L'ART

I.1. Problématique

L'enveloppe de bâtiment constitue en premier lieu la limite climatique. Auparavant, celle-ci était souvent définie par des éléments de la structure porteuse. Aujourd'hui, l'enveloppe de bâtiment doit répondre à une multitude d'exigences pour assurer des conditions de vie à l'intérieur de manière largement indépendante des circonstances extérieures.

Il est connu qu'une toiture horizontale contribue en grande partie à l'accumulation de la chaleur dans un bâtiment, notamment dans une région telle que Marrakech. Ainsi, celle-ci reçoit 1,5 fois plus d'énergie solaire qu'une paroi verticale orientée vers l'ouest et environ 4 fois plus qu'une paroi verticale orientée vers le sud [Amer, 2006]. Une toiture non-protégée pourrait donc être une source de chaleur et engendrer plus de consommations en refroidissement. En revanche, il existe plusieurs techniques passives qui augmentent la performance thermique de l'enveloppe des bâtiments. Ces techniques sont directement liées aux matériaux de construction et à l'architecture du bâtiment [Santamouris et al, 2007].

En outre, les consommations nécessaires à la fabrication des matériaux de construction sont devenues une problématique émergente. D'où la nécessité aujourd'hui de se pencher sur le sujet des matériaux naturels.

I.2. Les principes du rafraîchissement passif

Le rafraîchissement passif des bâtiments dans les climats modérés, ou dans les climats présentant une différence de température jour/nuit importante, repose sur l'utilisation d'une forte inertie thermique couplée à une protection solaire optimale le jour et sur une ventilation nocturne suffisante afin de réduire les pics de température dans les pièces le jour suivant [Brangeon, 2012]. Le rafraîchissement passif est organisé autour de trois principes [Santamouris, 2005]:

- La protection solaire ou thermique

Elle consiste à minimiser les apports de chaleur en limitant le rayonnement et la conduction à travers les parois.

- La dissipation thermique

Elle se base essentiellement sur l'utilisation d'un environnement dont la température est plus faible pour dissiper l'excès de chaleur dans le bâtiment.

- La modulation thermique.

Ce principe fait intervenir la capacité thermique du stockage des matériaux utilisés dans la construction. Le but principal est d'amortir la chaleur extérieure pénétrant dans le bâtiment.

I.3. Techniques de rafraîchissement passif ou semi-passif de l'air dans les bâtiments

Durant l'été, la consommation d'énergie pour le refroidissement représente un problème majeur pour les pays méditerranéens et sa demande augmentera du fait du réchauffement climatique [Isaac et van Vuuren, 2009]. À Marrakech (Maroc), par exemple, la climatisation est un poste important de la consommation d'énergie dans le secteur de la construction, qui pourrait être considérablement réduite par l'utilisation des techniques de rafraîchissement passif appelées « techniques passives ». En effet, l'objectif de ces techniques est d'améliorer le confort thermique dans les bâtiments non conditionnés et de réduire la consommation dans les bâtiments conditionnés en réduisant la température de l'air intérieur [Butera, 1994], [Omer, 2008] et [Pacheco et al, 2012].

Plusieurs chercheurs [Pacheco et al, 2012], [Tajero-Gonzalez et al, 2016], [Sadineni et al, 2011], [Hoy-Yen Chan et al, 2010] et [Geetha et Velraj, 2012] ont passé en revue différentes techniques passives de rafraîchissement de l'air dans les bâtiments. L'une des techniques de refroidissement passif les plus importantes concerne la protection thermique et solaire des toitures.

I.3.1. Techniques passives appliquées aux toitures

La toiture est un élément clé pour améliorer l'efficacité énergétique dans les bâtiments. Les techniques passives appliquées aux toitures (chaux, ombrage...) sont utilisables depuis des années. Cependant, après l'apparition des règlements de la construction, ces techniques ne sont plus utilisées comme auparavant, bien qu'elles aient un impact majeur sur la réduction de la consommation d'énergie et qu'elles améliorent le confort thermique des occupants.

Dans la littérature, plusieurs techniques passives appliquées aux toitures ont été testées expérimentalement en utilisant des cellules test dans des conditions climatiques extérieures réelles. [Nahar et al, 1999] ont mené une étude comparative de quatre techniques de refroidissement passif. Les auteurs ont évalué les performances thermiques de ces techniques dans le climat chaud et aride de Jodhpur (Inde) au moyen de cinq cellules test métalliques extérieures identiques de $(1.2 \times 0.6 \times 0.9) \text{ m}^3$ (Figure I.1). Les toitures de quatre cellules test ont été traitées selon les techniques étudiées alors que le toit de la cinquième cellule test est resté nu. Cette dernière, prise comme référence, a été utilisée pour déterminer la réduction de l'air intérieur et de la température du plafond pendant les journées chaudes d'été. Les auteurs ont comparé les performances des techniques suivantes: i/ toiture peinte en blanc, ii/ couche d'isolation thermique de 4 cm placée sous le toit, iii/ un réservoir d'eau de 10 cm d'épaisseur placé sur le toit avec une protection thermique mobile de 4 cm d'épaisseur et iv/ toit constamment irrigué pendant la journée (refroidissement par évaporation). Les meilleurs résultats sont obtenus par la technique de refroidissement par évaporation. Cependant, cette technique nécessite une quantité importante d'eau, ce qui n'est pas adapté à un climat aride. De plus, les résultats des auteurs montrent que la technique de la peinture blanche a bien fonctionné, car elle permet une réduction importante de la température de la surface du plafond, en particulier pendant la nuit.



Figure I.1. Photo des cinq cellules test munies des techniques passives [Nahar et al, 1999]

Une étude similaire impliquant plusieurs techniques de refroidissement passif a été menée par [Hamdan et al, 2011]. Quatre structures de $(0,6 \times 1 \times 1) \text{ m}^3$, chacune équipée d'une technique de refroidissement passif ont été monitorées durant une journée d'été 2010 à Amman (Jordanie). Ces techniques sont décrites dans le tableau I.1. Les auteurs ont montré que la technique D est la meilleure qui conduit à un bon refroidissement de l'air dans le climat chaud et aride d'Amman. Les auteurs ont également montré que l'efficacité de la couche d'argile augmente avec son épaisseur. L'épaisseur optimale déterminée par les auteurs est de 5 cm.

	A/ Toit standard sans traitement (référence) en béton d'une épaisseur de 8 cm.
	B/ Toit A recouvert d'une fine couche de ciment blanc
	C/ Toit A avec des morceaux de vitrage blanc brisés collés dessus.
	D/ Toit A recouvert d'une couche d'argile de 3 cm d'épaisseur.

Tableau I.1. Les quatre techniques passives étudiées en Jordanie [Hamdan et al, 2011]

Dans une autre étude expérimentale, [Amer, 2006] a étudié expérimentalement l'effet de plusieurs techniques de refroidissement passif appliquées dans le toit: i/ peinture blanche, ii/ 5 cm d'isolation thermique en laine de verre placée au-dessus du toit, iii/ cheminée solaire et iv/ refroidissement par évaporation à travers une série de tuyaux en PVC équipés d'arroseurs permettant de maintenir le toit constamment humide. Deux cellules test en tôle galvanisée avec cadre en acier ont été construites par l'auteur pour les essais (Figure I.2).

Les techniques étudiées ont été introduites sur le toit de l'une des cellules test, une à la fois, tandis que le toit de la seconde cellule test a été maintenu nu (référence). Ainsi, l'auteur a conduit les expériences pour chaque technique en comparant la température moyenne de l'air intérieur de la cellule test à celle mesurée à l'intérieur de la cellule de référence. Ces expériences ont été réalisées à Manoufia en Egypte pendant l'été avec un rayonnement solaire global élevé pouvant atteindre 1100 W/m^2 . Les résultats montrent que la différence moyenne quotidienne de la température de l'air intérieur entre les cellules test munies des techniques passives et la cellule test de référence a atteint: $6,5^\circ\text{C}$ pour le toit peint en blanc, 7°C pour le toit isolé, $8,5^\circ\text{C}$ pour la cheminée solaire et $9,8^\circ\text{C}$ pour le toit refroidi par évaporation. Il est important de mentionner que ces réductions ne doivent pas être comparées car les conditions météorologiques étaient très différentes au cours des expériences.

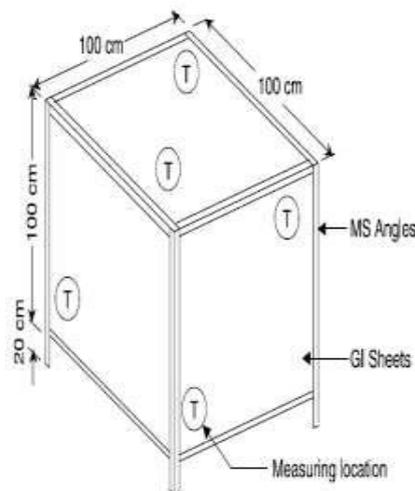


Figure I.2. Schéma des deux cellules test [Amer, 2006]

Les résultats de [Amer, 2006] sont similaires à ceux trouvés dans d'autres études expérimentales, en particulier pour la technique de peinture blanche [Hamdan et al, 2011] et [Nahar et al, 2003] et l'isolation thermique [Nahar et al, 1999] et [Nahar et al, 2003]. Ces auteurs ont mené une étude expérimentale sur des techniques passives similaires à celles de [Amer, 2006] dans le climat aride de Jodhpur en Inde. Cependant, les expériences des auteurs ont été réalisées simultanément pour toutes les techniques contrairement à ce qu'il a été fait par [Amer, 2006]. Ces expériences ont été réalisées en cellules test similaires à celles de [Nahar et al, 1999]. Les résultats obtenus par les auteurs montrent qu'au cours d'une journée typique de l'été, la différence de température moyenne entre les différentes cellules test équipées de techniques passives et la cellule test de référence est: $5,4^\circ\text{C}$ pour le toit peint en blanc, $3,4^\circ\text{C}$ à $5,8^\circ\text{C}$ pour le toit isolé (selon le type d'isolation), $13,2^\circ\text{C}$ pour le toit refroidi par évaporation et $11,2^\circ\text{C}$ pour le toit avec des carreaux blancs émaillés collés dessus. Les auteurs ont conclu que le refroidissement par évaporation est la meilleure technique passive. Néanmoins, cette technique demande une grande quantité d'eau (environ 50 l/m^2 d'eau par jour). Les auteurs recommandent donc les carreaux blancs émaillés qui sont durables. De plus, les auteurs ont mené des recherches sur la performance thermique de ces techniques passives en hiver. Les résultats montrent que le réservoir d'eau avec une protection thermique mobile est la technique unique qui fonctionne parfaitement en été et en hiver. En effet, cette

technique fournit la plus forte augmentation de la température de l'air intérieur avec une moyenne de 2,6°C.

Une autre étude expérimentale intéressante sur les toits horizontaux a été réalisée par [Pearlmutter et Rosenfeld, 2008]. Cette étude a été réalisée avec deux cellules test identiques de 8 m³ réalisées en blocs de béton isolés pour les murs et une dalle de béton sans aucune isolation thermique pour le toit. Les toits des cellules test sont couverts d'une couche de terre de 16 cm. Cette couche de terre dans l'une des cellules test a été continuellement arrosée et ombragée successivement par un voile d'ombrage et une couche de gravier. Les auteurs ont évalué les performances thermiques de ces techniques au moyen de campagnes de mesures estivale et hivernale dans le climat chaud et aride du désert du Néguev. Les mesures ont concerné la température de l'air intérieur ainsi que le flux de chaleur à travers le toit. Les résultats montrent un effet substantiel de la couche de terre sèche en termes de stabilisation de la température et de déphasage horaire. Cependant, la terre sèche ne procure aucun effet de refroidissement contrairement à la couche de terre sèche arrosée qui abaisse la température du plafond de 4°C avec une consommation quotidienne d'eau de 8 l/m². L'ajout de la couche de gravier de 6 cm sur la terre arrosée entraîne une stabilité élevée de la température du plafond de la cellule test. De plus, le voile d'ombrage fournit une température de plafond légèrement plus basse. De plus, les auteurs concluent que le gravier a l'avantage de réduire fortement la consommation d'eau pour l'irrigation de la couche de terre. Il convient de mentionner que les auteurs ont effectué une analyse comparative de leurs techniques passives en utilisant une température dite «normalisée» obtenue à partir de la température mesurée à un jour donné et le rapport de la température moyenne de la cellule test de référence pendant toute la durée de mesures et la température de la cellule test de référence pour le jour donné.

[Al-Aturki et Zahi, 1991], ont étudié un système de rafraîchissement passif par évaporation en utilisant l'arrosage d'une toiture. L'expérience a été faite sur une toiture arrosée durant la journée en été à Djeddah en Arabie Saoudite. Le modèle expérimenté a montré que l'énergie échangée avec l'air extérieur par l'évaporation de l'eau d'arrosage peut réduire la charge de la climatisation de 40% dans ce climat chaud et sec. Les auteurs ont remarqué que pour le cas d'un arrosage uniformément réparti sur la toiture, la température surfacique de la toiture a diminué de 60°C à 40°C, durant un jour d'été en août 1990. Une autre étude expérimentale a été menée en Avril 1996 par [Al-Turki et al, 1997] à Djeddah en Arabie Saoudite pour l'amélioration de la performance thermique d'une toiture, par l'utilisation d'une couche de gravier. Ils ont expérimenté une toiture en béton armé de 20cm × 20cm × 3cm, isolée par une couche de laine de verre de 5 cm d'épaisseur sur les quatre côtés extérieurs, pour réduire au maximum le transfert de chaleur à travers le périmètre de la dalle (Figure I.3). La température est mesurée dans six différents points et à deux profondeurs (3 et 27 mm) de la face supérieure de cette toiture. Cinq toitures en béton recouvertes par plusieurs types de graviers de différents diamètres (4,5 à 12,5 mm) ont été expérimentées et comparées à une toiture de référence en dalle nue. L'effet de la couche de gravier sur la réduction de la température dans les différents points de mesure présente un écart de température entre l'extérieur et les points de mesure d'environ 10°C. Ces couches de gravier présentent également un effet bénéfique

sur le temps de réponse de la toiture (déphasage entre la toiture de référence et les toitures traitées) qui peut aller jusqu'à 3 heures, selon les auteurs.

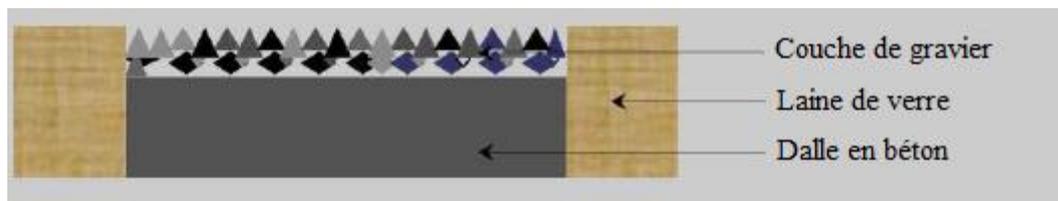


Figure I.3. Toiture expérimentée [Al-Turki et al, 1997]

Récemment, [Sabzi et al, 2015] ont mené une étude numérique et expérimentale de trois techniques de refroidissement passif. Les techniques passives étudiées sont: un réservoir d'eau, des sacs remplis d'eau et l'ombrage. Ces techniques ont été appliquées sur le toit d'une cellule test construite à Shiraz (Iran), dont le climat est très chaud et sec en été. Les résultats expérimentaux ont été utilisés pour la validation d'un code numérique dont les résultats montrent que la technique du réservoir d'eau permet une grande économie d'énergie en termes de refroidissement. De plus, les auteurs ont constaté que la performance énergétique de l'ombrage est proche de celle du réservoir d'eau sauf l'après-midi où l'évaporation de l'eau permet un refroidissement supplémentaire du toit. La même technique du réservoir d'eau a été étudiée par [Rincón et al, 2000] dans un climat humide et chaud. L'étude a été réalisée sur deux cellules test de $(3 \times 3 \times 2,45) \text{ m}^3$ à Maracaibo en Venezuela. Le toit de la première cellule test est isolé (référence) et celui de la deuxième cellule test est protégé par un réservoir d'eau isolé par deux panneaux d'isolation thermique en polystyrène et en fibres de verre peinte en blanc (Figure I.4). Les résultats de leur étude montrent que l'écart entre la température intérieure de la cellule test dont le toit est protégé par le réservoir d'eau, et la température extérieure est de l'ordre de 9°C alors qu'il est de 1°C pour la cellule test de référence.

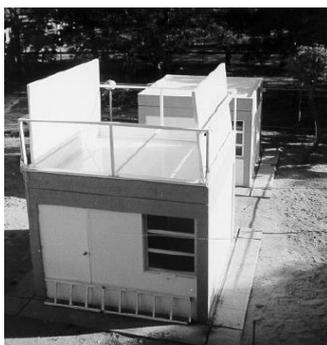


Figure I.4. Cellule test avec un toit protégé [Rincón et al, 2000]

Par ailleurs, [Ben Cheikh et Bouchair, 2008] ont réalisé une étude expérimentale sur un système de refroidissement passif utilisant une toiture réfléchive-évaporative pour une journée d'été en Juin 2007, dans la région de Laghouat en Algérie. Le système étudié est une cellule test métallique étanche de dimensions $(0,7 \times 0,7 \times 0,9) \text{ m}^3$ dans laquelle sont déposés des galets insérés dans l'eau (Figure I.5). La face supérieure de la cellule test est recouverte par une tôle en aluminium peinte en blanc pour augmenter sa réflexion solaire. Une lame d'air sépare la surface supérieure des galets et le couvercle. Plusieurs combinaisons de cette

technique passive ont été expérimentées dans l'objectif de diminuer la température intérieure dans la cellule test. Les résultats obtenus montrent que la température de l'air intérieur peut être réduite de l'ordre de 6 à 10°C. Cette réduction peut être augmentée de 2 à 3°C en associant la technique passive étudiée à la ventilation naturelle nocturne.



Figure I.5. Toiture réfléchive-éaporative [Ben Cheikh et Bouchair, 2008]

Afin d'augmenter la réflectivité des toitures, [Miranville, 2002] a évalué la performance thermique des produits minces réfléchissants (PMR) par le biais d'une étude expérimentale sur la toiture d'une cellule test dans le climat tropical humide de l'île de La Réunion. L'auteur montre, d'après l'étude comparative entre une toiture avec PMR et une toiture de référence (tôle/lame d'air/plafond) qui est répandue à La Réunion et réputée pour son inconfort, que l'ajout du PMR engendre une réduction de l'ordre de 80% de flux de chaleur transmis à travers la toiture par rapport à la configuration de référence.

"Les Cool Roofs sont le moyen le plus rapide et le moins coûteux de réduire le changement climatique". Steven Chu, prix Nobel de Physique et ex-secrétaire d'état USA à l'énergie. Cette citation montre clairement l'importance de peindre les toitures en blanc. Cette technique vise essentiellement à réduire l'absorption du rayonnement solaire par le toit et à améliorer son émissivité pour un refroidissement passif. Celle-ci a été largement étudiée sous différents climats. Dans ce sens, [Garg et al, 2015] ont mené une étude expérimentale comparative sur des salles de classe non conditionnées de taille et d'occupation similaires dans les régions d'Hyderabad et de Nagpur en Inde. L'un des toits des salles de classe est recouvert d'un revêtement avec une grande réflectance solaire (céramique mélangée polymère-acrylique) et l'autre n'est pas traité. Les résultats expérimentaux des auteurs montrent que la température moyenne de l'air intérieur, la température du plafond et la température surfacique extérieure du toit, ont été réduites respectivement de 2,1°C, 5°C et 12,3°C à Hyderabad, alors qu'elles ont été réduites de 1,5°C 4°C et 9,5°C respectivement à Nagpur. Dans le même contexte des bâtiments scolaires, [Synnefa et al, 2012] ont réalisé une étude expérimentale et numérique pour examiner l'impact d'un revêtement « Cool roof » sur le comportement thermique d'un bâtiment scolaire à Athènes, en Grèce. La surface initiale du toit était grise avec une réflectance solaire de 0,2. Les auteurs affirment que l'application d'un revêtement élastomère blanc, avec une réflectance solaire de 0,89, permet de réduire la température de l'air intérieur du bâtiment de 1,5 à 2°C en été et de 0,5°C en hiver. De plus, les résultats numériques ont montré que le revêtement appliqué au toit réduit la charge de refroidissement du bâtiment de 40% tout en augmentant légèrement sa charge de chauffage de 10%. Une étude similaire a été

menée par [Romeo et Zinzi, 2013] à travers une campagne de mesures et des simulations dynamiques sur un bâtiment non conditionné à Trapani (Sicile), afin d'évaluer l'impact de la peinture blanche à double couche avec une réflectance solaire de 0,88. Les auteurs montrent que cette technique a permis de réduire la température surfacique extérieure du toit de 20°C et a permis une réduction moyenne de la température opérative de 2,3°C. En outre, l'étude numérique montre que cette technique a permis une réduction de 54% de la charge de refroidissement.

D'autre part, plusieurs études basées sur des simulations thermiques dynamiques par des logiciels commerciaux comme TRNSYS et EnergyPlus, ont été menées dans l'objectif d'évaluer les performances thermique et énergétique de différentes techniques de rafraîchissement passif. [Toguyeni et al, 2012] ont réalisé une étude sur l'effet de l'isolation thermique du toit d'une maison typique à Ouagadougou au Burkina Faso (climat tropical et sec) par des matériaux d'isolation locaux, sur la charge de refroidissement. Les parois verticales du bâtiment sont construites en mélange argile-paille et le toit est isolé par le bois blanc ou par des panneaux isolants en fibre naturelle. Les auteurs ont constaté que l'argile-paille réduit la charge de refroidissement de 8% par rapport à des parois en argile. Ils ont montré également qu'une épaisseur d'isolation thermique de 1,5 cm du toit procure des économies de charge de refroidissement de 6,2% à 12,1% pour le bois rouge et le panneau isolant en fibres naturelles et un mélange chaux-ciment respectivement. Dans le but d'étudier l'effet de trois types d'isolation thermique (polystyrène, laine de roche et lame d'air) couramment utilisés en Jordanie, [Mohsen et Akash, 2001] ont réalisé une étude comparative durant la période froide qui dure généralement six mois pour trois configurations du bâtiment, à savoir ; sans isolation, avec isolation des murs uniquement et avec isolation des murs et du toit. Les auteurs ont conclu que l'isolation des murs avec le polystyrène conduit à une réduction de la charge de chauffage du bâtiment de 36%, alors que les murs isolés par une lame d'air réduit cette charge par 5,4%. Ils affirment également que l'isolation thermique du toit et des murs par le polystyrène réduit la charge de chauffage du bâtiment jusqu'à 78.6%. Pour un climat chaud et semi-aride, une étude a été menée par [Laaouina et al, 2012], [Benhamou et Bennouna, 2013] sur l'effet de quelques techniques passives sur la charge thermique d'un bâtiment résidentiel situé dans la ville de Marrakech. Les résultats ont montré que l'isolation thermique du toit réduit la charge thermique d'environ 40%. Une étude similaire a été menée par [Guechhati et al, 2010] sur l'effet de l'isolation thermique sur la consommation d'énergie d'un bâtiment situé à Oujda. Les auteurs ont comparé plusieurs variantes et ont conclu que l'isolation du toit et l'isolation des murs extérieurs avec 6 cm de polystyrène réduit la charge de chauffage de 16,4%. Dans le même contexte du climat méditerranéen, [Zinzi & Agnoli, 2012] ont réalisé une étude comparative entre deux techniques de refroidissement passif qui relèvent du principe de la protection solaire du toit et ceci dans des bâtiments résidentiels, situés dans trois villes du bassin méditerranéen, à savoir ; Le Caire, Barcelone et Palerme. Trois variantes ont été considérées dans leurs simulations thermiques dynamiques. La première est un toit standard (référence), la deuxième est une couche réfléchissante dont le coefficient de réflexion solaire est de 0,65 et une émissivité de 0,4, et la troisième variante est un toit végétalisé. Les auteurs affirment que les toits munis d'une couche réfléchissante sont bénéfiques pour le refroidissement dans les villes du bassin

méditerranéen. Elle permet de réduire la charge de refroidissement d'environ 85% à Barcelone, 72% à Palerme et de 59% à 71% au Caire. Cependant, cette technique ne fait qu'augmenter la charge de chauffage entre 23% et 25% à Barcelone, entre 37% et 40% à Palerme et entre 58% et 67% au Caire. En ce qui concerne la technique du toit végétalisé, sa modélisation est très difficile à faire en raison de nombre important de paramètres qui entrent en simulation, selon les auteurs. En effet, la comparaison entre les deux variantes montre que la technique du toit végétalisé permet de réduire la charge énergétique annuelle de 9,8%, 9% et 14% à Barcelone, Palerme et au Caire respectivement. Les auteurs affirment que cette technique performe bien dans les saisons chaudes mais elle nécessite une grande quantité d'eau.

De plus, la végétation modifie le microclimat en diminuant les températures de l'air et de la surface et en augmentant l'humidité relative de l'air. En effet, [Theodosiou, 2003] a montré via une simulation numérique de plusieurs configurations (densité et hauteur de plante et isolation du toit) d'une toiture végétalisée d'un bâtiment bureau situé en Grèce, que cette technique joue un rôle très important dans le rafraîchissement des bâtiments pendant la période estivale. Les résultats varient en fonction de plusieurs paramètres tels que l'isolation du toit, la hauteur et la densité des plantes. Dans le même sens, [Pérez et al, 2012], ont fait une étude comparative sur l'effet du toit végétalisé dans un climat méditerranéen continental sur le comportement thermique et la consommation d'énergie. Ils ont utilisé trois cellules test identiques (Figure I.6), deux d'entre elles ont un toit végétalisé sans isolation thermique et la troisième a un toit isolé. Les auteurs affirment que les toits végétalisés constituent un grand potentiel d'économie d'énergie durant la saison chaude. Une étude similaire sur la même technique a été réalisée par [Takakura et al, 2000]. Ils ont étudié l'effet de trois différentes techniques sur l'amélioration de la performance thermique des toitures par le biais de quatre cellules test identiques. Chaque cellule test est composée d'une dalle en béton armé de 90 cm × 90 cm × 6 cm qui couvre un espace de 30 cm de hauteur et les cinq autres côtés de la cellule test sont fermés par un isolant thermique en polystyrène de 5 cm d'épaisseur (Figure I.7). La dalle de la première cellule test est nue (référence). La dalle de la deuxième cellule test est recouverte de 15 cm d'épaisseur de sol non humide. Dans la troisième cellule test, la dalle est recouverte de 15 cm d'épaisseur de sol humide et dans la quatrième cellule test, la dalle est recouverte de 15 cm de sol humide et sur lequel des végétations sont implantées. Une feuille de plastique est placée entre la dalle et le sol pour éviter l'infiltration de l'eau et facilite son drainage, qui se fait à l'aide des tubes de PVC placés sous le sol. Les résultats expérimentaux montrent que la quatrième configuration du toit est la plus performante. Les auteurs expliquent qu'une quantité d'énergie est perdue par l'évaporation d'eau dans le sol. Néanmoins, le poids de sol humide exerce une lourde charge sur la dalle.



Figure I.6. Cellules test avec toit végétalisé [Pérez et al, 2012]

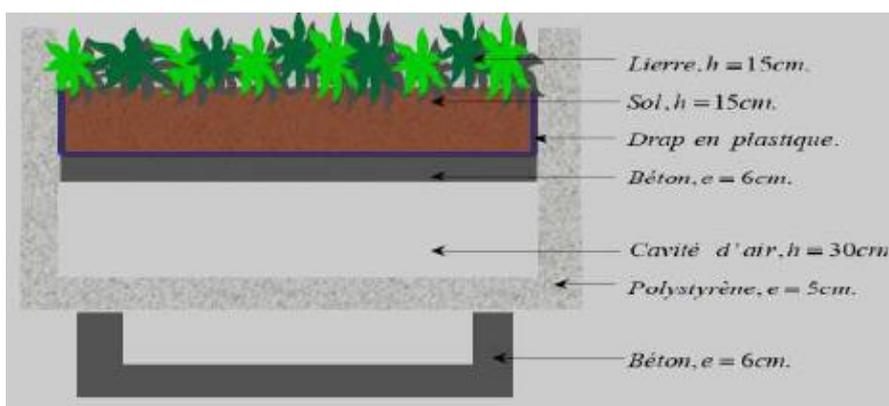


Figure I.7. Schéma de la cellule test avec toit végétalisé [Takakura et al, 2000]

I.3.2. Autres techniques passives et semi-passives de rafraîchissement de l'air dans les bâtiments

Il existe d'autres techniques passives et semi-passives de rafraîchissement de l'air dans les bâtiments. La ventilation naturelle, par exemple, est l'un des processus qui permet de dissiper la chaleur en cas des surchauffes. Cette technique s'appuie sur l'utilisation de plusieurs technologies, notamment celles du puits canadien et de la cheminée solaire. En effet, lors d'une période caniculaire, seule la cheminée solaire peut offrir une ventilation passive. Le tube de la cheminée est peint en noir de façon à absorber la chaleur plus facilement. Quand l'air à l'intérieur de la cheminée est chauffé, il s'élève et aspire l'air frais en dessous provenant d'une fenêtre ouverte ou d'un puits canadien. En effet, [Khanal et Lei, 2011] ont montré que la technique de la cheminée solaire peut fournir des économies d'énergie de l'ordre de 10% pour le refroidissement et d'environ 15% pour la ventilation.

D'autre part, le puits canadien s'appuie essentiellement sur l'énergie présente dans le sol. Son principe repose sur l'utilisation d'un conduit enterré dans le sol dans lequel circule l'air neuf grâce à un ventilateur, avant de le souffler dans le bâtiment. La stabilité de la température du sol permet un fonctionnement efficace de cette technique. Récemment, [Khabbaz, 2016] a mené une étude expérimentale sur un échangeur air-sol installé dans une maison située dans la banlieue de Marrakech. Ce système est composé de trois tubes en PVC, de 72 m de longueur, enterrés à une profondeur de 2,2 à 3,2 m. Les résultats du monitoring ont montré que la technique du puits canadien procure une température de soufflage quasi-constante d'environ 22°C pour un débit de 244 m³/h et 25°C pour un débit de 312m³/h, avec une humidité relative autour de 50% alors que la température de l'air extérieur dépasse 40°C.

En outre, la ventilation traversante constitue également un véritable potentiel de rafraîchissement passif dans les bâtiments. Elle est généralement assurée par l'ouverture des fenêtres qui permet un renouvellement d'air. Ce mécanisme est souvent utilisé pour évacuer la chaleur emmagasinée durant la journée dans l'enveloppe du bâtiment. Cependant, son utilisation n'a pas d'intérêt dans les périodes caniculaires. L'efficacité de la technique de ventilation traversante dépend parfaitement de l'orientation des ouvertures. Selon [Krikorian et al, 2003] cette technique peut avoir plusieurs conséquences, notamment la surconsommation de chauffage.

Par ailleurs, l'utilisation des matériaux à forte capacité de stockage thermique permet d'améliorer l'inertie thermique du bâtiment. En effet, une inertie thermique élevée est capable d'assurer un meilleur confort intérieur en atténuant l'impact des changements de température extérieure sur les environnements intérieurs conditionnés. L'utilisation de murs à haute inertie thermique, avec une excellente isolation thermique, dans les bâtiments entraîne une réduction des besoins en énergie [Karlsson et al. 2013] et [Orosa et Oliveira, 2012].

I.4. Construction à base de matériaux naturels et enjeux du développement durable

Dans le secteur du bâtiment, la consommation d'énergie grise liée à la phase de fabrication du matériau de construction prend une part de plus en plus importante dans le bilan global énergétique. Il devient donc nécessaire de diminuer cette consommation.

Les matériaux naturels ou non-industriels utilisés dans le domaine de la construction sont généralement fabriqués et mis en place par des artisans. Il s'agit souvent de matériaux issus de matières premières renouvelables, comme les matériaux végétaux (roseaux, fibres de palmier dattier) et qui répondent aux problèmes de l'épuisement des ressources naturelles. Il s'agit également de matériaux recyclables comme la terre qui répond aux problèmes de déchets liés à la déconstruction (fin de vie du bâtiment).

Par ailleurs, l'utilisation des matériaux non-industriels devient prometteuse, notamment dans les pays en développement puisque ces matériaux sont moins chers que les produits industriels.

I.4.1. Construction en pisé

Les systèmes de construction en terre (adobe, pisé, torchis, fonte ...) sont basés sur l'utilisation de matériaux naturels à très faible énergie grise et respectueux de l'environnement à la fin de la vie du bâtiment [Morel et al, 2001] et [Schroeder, 2012]. Ces systèmes sont utilisés pendant des milliers d'années dans le monde entier. Cependant, ils sont de moins en moins utilisés avec le développement de matériaux de construction industriels, en particulier le béton. L'architecture en terre a été réinventée par plusieurs architectes dont Hassan Fathy [Fathy, 1973], [Fathy, 1986], qui a tenté de restaurer la construction en utilisant des matériaux et des techniques locaux qui contribuent à l'autonomie des communautés et dynamisent leur économie locale. Vers la fin du 20ème siècle, plusieurs codes et normes pour l'architecture en terre ont émergé à travers des recherches et des études sur les performances sismiques et

durables (Australian Earth Building Handbook, California Historical Building Code, Chinese Building Standards ...) [ASTM E2392/E2392M-10, 2010]. Au Maroc, un règlement de construction parasismique pour les bâtiments en terre [RPACT, 2011] est entré en vigueur en 2013 en complément de la réglementation relative aux matériaux conventionnels (RPS 2000).

Le pisé est l'une des techniques les plus répandues dans les zones rurales marocaines et notamment dans la région Sud [Baglioni et al, 2016]. En effet, elle est souvent réalisée de manière traditionnelle par le biais des coffrages en bois et une dame manuelle. Deux types de pisé peuvent être distingués, le premier étant traditionnel, également appelé « pisé non-stabilisé » et est composé de limon, de sable, de gravier et d'eau et le seul liant est l'argile. Le second est un pisé moderne qui utilise des liants tels que le ciment, la chaux... ce type est nommé « pisé stabilisé ». D'autre part, la stabilisation du pisé ne fait qu'augmenter le coût de la construction et rendre le recyclage difficile, voire impossible. Cependant, il est nécessaire de stabiliser le pisé dans les cas où l'on souhaite augmenter sa résistance à l'eau et améliorer sa résistance mécanique.

Les architectes et les scientifiques ont trouvé que le pisé, connu pour sa masse thermique élevée, offre un très bon confort thermique dans plusieurs climats dans le monde [Mortensen, 1994], [Easton, 1996], [Reardon et al, 2013], [Minke, 2000], [MacLeod, 2002]. Par ailleurs, plusieurs recherches ont été réalisées en laboratoire à travers des tests sur des échantillons afin de déterminer les caractéristiques thermiques du pisé [CSIRO, 2000], [CSTB, 2011], [Hall et Allinson, 2008], [Adam et Jones, 1995], [Chabriac, 2014], [Laurent, 1986], [Heathcote, 2011], [Xinxin et al, 2016]. Ces études montrent que la conductivité thermique du pisé oscille de 0,3 à 1,4 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour des masses volumiques comprises entre 1700 et 2200 $kg.m^{-3}$. En outre, d'autres recherches ont été réalisées sur le confort des logements à partir de calculs ou de modèles [Porta-Gandara et al, 2002] et [Parra-Saldivar et Batty, 2006]. Ainsi que d'autres études qui ont été basées sur des enquêtes de satisfaction, des factures d'énergie ou des études expérimentales. En effet, Soebarto [Soebarto, 2009] a mené une étude expérimentale et numérique pour comparer deux bâtiments construits en pisé d'une épaisseur de 220 mm, l'un en pisé isolé et l'autre en pisé non isolé. Les résultats montrent que la performance énergétique des deux bâtiments est la même en été. Contrairement à l'hiver, le bâtiment en pisé non isolé nécessite plus de besoins en chauffage. Une étude similaire menée par [Paul et Taylor, 2008] sur trois bâtiments, dont deux sont en matériaux industriels (ossature aluminium et blocs d'isolation) et le troisième est construit en pisé de 30 mm d'épaisseur. L'étude s'est déroulée dans une période estivale et s'est basée sur une enquête qui vise l'évaluation de la satisfaction des occupants. Les auteurs affirment que les occupants du bâtiment en pisé se sont sentis mieux que les occupants des deux bâtiments en matériaux industriels. En outre, la climatisation n'a pas été utilisée dans le bâtiment en pisé. Plusieurs autres études ont été menées dans le même contexte, à savoir ; [Taylor et al, 2008], [Taylor et Luther, 2004], [Soudani et al, 2016], [Serrano et al, 2016], [El Fgaier et al, 2015], [Palme et al, 2014].

La performance énergétique et acoustique, la résistance au feu et la contribution au développement durable font du pisé une technique prometteuse pour la construction de maisons individuelles dans le futur selon [Walker et al, 2005], [Houben et Guillaud, 2006],

[Bruce, 2008] et [Fernandez, 2006]. Cependant, la plupart des études sur la performance énergétique du pisé ont été réalisées dans des pays tels que l'Australie, l'Angleterre et les États-Unis où l'épaisseur des murs en pisé ne dépasse pas généralement 30 cm. Dans cette thèse, nous avons évalué la performance énergétique d'un bâtiment dont les murs sont construits en pisé stabilisé d'une épaisseur de 53,7 cm, dans la ville de Marrakech dont le climat est chaud et semi-aride.

I.4.2. Isolants naturels

L'utilisation des matériaux naturels dans la construction peut jouer un rôle très important dans les stratégies de l'efficacité énergétique et le développement durable. Généralement, ces matériaux sont issus d'une origine végétale et leur utilisation permet de valoriser les déchets non réutilisables. Par ailleurs, de nombreux isolants naturels sont utilisés dans le domaine de la construction. [Asdrubali et al, 2015] ont récemment passé en revue certains isolants utilisant des ressources naturelles, locales et renouvelables comme les roseaux et les fibres de palmier dattier qui sont d'ailleurs très présents dans la région de Marrakech.

Les roseaux sont des éléments naturels et renouvelables qui ont été utilisés pendant des siècles comme un matériau de construction. La technique de construction utilisant des roseaux est appelée 'Tataoui' dans la région sud du Maroc (Figure I.8), elle consiste à placer des roseaux sur une structure en bois en forme de poutres [Baglioni et al, 2016]. Dans nos jours, les roseaux constituent un isolant thermique et acoustique performant dont la conductivité thermique varie entre 0,045 et 0,056 W/m.K, la chaleur spécifique peut atteindre un maximum de 1200 kJ/kg.K et un coefficient d'absorption supérieur à 0,5 pour toutes les fréquences supérieures à 300 Hz [Asdrubali et al, 2015].



Figure I.8. Technique Tataoui [Baglioni et al, 2016]

Selon une étude comparative réalisée par [Parc Eco-Habitat, 2011], un panneau de roseaux utilise une énergie grise de 17 kWh ep/m² et une empreinte carbone estimée à -78 kg CO₂ eq/m². Quant au polystyrène expansé, le plus utilisé au Maroc, il utilise une énergie grise de 81 kWh ep/m² et une empreinte carbone de 10 kg CO₂ eq/m².

D'autre part, les fibres de palmier dattier (FDP) sont des éléments abondants et constituent une source de pollution en cas d'élimination. Ces éléments naturels sont très répandus dans les régions Sud marocaines du fait de la forte présence du palmier dattier. En effet, le Maroc occupe le 6ème rang en termes de superficie de palmiers et le 11ème en termes de production

de dattes [FAOSTAT, 2015]. Les palmiers dattiers occupent une superficie d'environ 50 000 ha, pour un total de près de 5 millions de palmiers, représentant 4,8% des palmiers du monde et le Maroc prévoit de planter 1,7 million de palmiers à l'horizon 2020 [MAPM, 2015]. Ces palmiers produisent des tonnes de déchets qui sont souvent traités comme des ordures qui sont généralement brûlées ou abandonnées dans la nature. Cependant, plusieurs chercheurs se sont focalisés sur l'aspect thermique de ces produits, et notamment dans les régions où les palmiers dattiers sont très répandus [Oushabi et al. 2015], [Djoudi et al. 2014], [Chikhi, 2016], [Benmansour et al. 2014]. Récemment dans la région de Marrakech, [Boumhaout et al, 2017] ont mené une caractérisation thermo-mécanique d'un matériau bio-composite, mortier renforcé par des fibres de palmier dattier. Les auteurs ont étudié plusieurs pourcentages des FPD intégré dans le mortier. Leurs résultats montrent que l'utilisation des FPD améliore les performances thermiques du mortier.

L'utilisation des matériaux purement naturels ne représente aucun danger pour la nature. Ils sont, en effet, biosourcés et ne nécessitent aucun traitement chimique lors de la phase de fabrication. Ces matériaux sont généralement réutilisables en fin de vie de la construction.

I.5. Généralités sur le confort thermique dans les bâtiments

Le confort thermique est une condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique [ASHRAE, 1997] et [AFNOR, 1995]. En raison de sa subjectivité, le confort thermique est différent pour chaque individu. Il est maintenu lorsque la chaleur générée par le métabolisme humain peut se dissiper à un rythme qui maintient l'équilibre thermique dans le corps. En effet, tout gain ou perte de chaleur au-delà de cela génère un inconfort. Nous notons alors que le confort thermique est maintenu dans une pièce lorsque la chaleur produite par le corps est égale à la chaleur perdue. Le confort thermique dépend de plusieurs paramètres, à savoir ; la température ambiante, la température radiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air, quantité d'énergie dépensée et les vêtements utilisés.

Selon la norme américaine [ASHRAE, 2010], la zone de confort thermique est définie pour les saisons hivernales et estivales suivant la figure I.9.

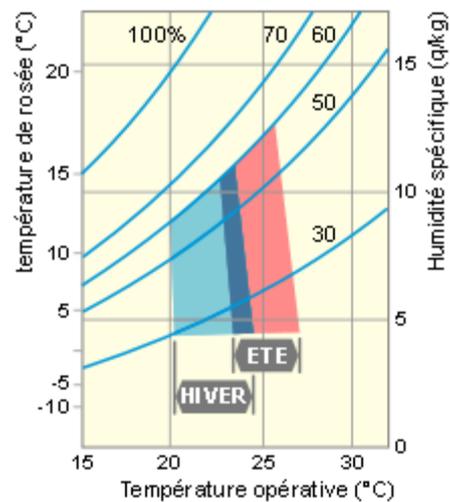


Figure I.9³. La zone de confort thermique définie par [ASHRAE, 2010]

Parmi un certain nombre d'approches décrivant le confort thermique humain, un modèle a été largement utilisé dans la recherche universitaire: « PMV, PPD » de [Fanger, 1970]. Ce modèle est basé sur un travail expérimental dans une chambre climatique pour quantifier le confort thermique des personnes engagées dans des conditions thermiques transitoires en tant que véritables utilisateurs. Le PMV (Predicted Mean Vote) prédit le vote de confort moyen des occupants sous la forme de pourcentage de personnes insatisfaites PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) qui est lié aux conditions climatiques, l'habillement et l'activité physique. [Humphreys et Nicol, 1998] ont montré que la température de l'air extérieur joue un rôle important dans ce modèle et que les plages de température de confort thermique sont différentes d'un individu à l'autre.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à un bâtiment à échelle nature qui correspond à une salle de cours (bâtiment tertiaire). Dans ce contexte, plusieurs études récentes sur le confort thermique ont été menées dans des salles de cours en différents climats du monde. [Fang et al, 2018] ont étudié le confort thermique adaptatif dans des salles de cours climatisées à Hong Kong par le biais d'une enquête sur le terrain menée dans le campus universitaire de Hong Kong. Cette enquête a couvert la mesure objective des paramètres de l'environnement thermique et des réponses thermiques humaines subjectives. Au total, 982 étudiants bénévoles ont participé à l'enquête. Les résultats indiquent que les élèves en vêtements légers se sont adaptés aux environnements de classe plus frais. La température neutre est très proche de la température préférée d'environ 24°C. Les auteurs affirment que plage de températures de confort se situe entre 21,56 °C et 26,75°C. [Jindal, 2018] a réalisé une étude de terrain sur le confort thermique dans des salles de classe naturellement ventilées, situées dans la zone climatique d'Ambala, en Inde. Au total, 640 réponses provenant de 130 élèves âgés de 10 à 18 ans. Une température opérative de 27,1°C a été enregistrée comme température neutre. L'auteur a constaté que les étudiants se sentent à l'aise dans une plage de température opérative de 15,3 à 33,7°C. Les résultats ont montré que la tolérance à la chaleur des étudiants est assez élevée. D'autres études similaires vont dans le même sens et se sont

³ Source : <https://www.energieplus-lesite.be>

intéressées à l'évaluation du confort thermique dans des salles de cours [Ricciardi et Buratti, 2018], [Yang et al, 2018], et [Conceicao et Lucio, 2008].

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude bibliographique a été préalablement réalisée sur les techniques de rafraîchissement passif dans le bâtiment. Ces techniques permettent de réduire la consommation énergétique des bâtiments tout en y procurant un niveau de confort thermique acceptable. A cet effet, plusieurs travaux expérimentaux s'appuyant sur des cellules-test exposées à des charges climatiques réelles, ont été analysés. Ces travaux ont de façon générale, porté sur l'amélioration des performances thermiques des toitures (soit par leur protection contre les rayons solaires directs, soit par la mise en place d'autres techniques). En particulier, certains travaux ont regardé l'avantage d'utiliser des matériaux naturels ou non-industriels, afin de contribuer d'une part au développement durable, mais également d'améliorer le confort thermique dans le bâtiment d'autre part.

A la suite à cette étude bibliographique, nous remarquons que l'évaluation de la performance thermique des techniques passives pour les toitures des bâtiments mérite encore d'être approfondie. En effet, les performances thermiques de ces techniques sont dépendantes du climat et doivent être explorées dans des conditions climatiques réelles. De plus, même si bon nombre de ces techniques ont été largement étudiées dans la littérature, les mesures effectuées pour l'évaluation de leur performance thermique se limitent essentiellement aux mesures de la température de l'air intérieur. En outre, la revue de littérature montre que l'évaluation de la performance thermique des constructions en pisé est étudiée généralement dans des pays comme les Etats-Unis, l'Australie... là où le mode de construction (mise en œuvre) en pisé est différent que celui dans les zones rurales marocaines. Par ailleurs, il est nécessaire d'étudier la performance thermique et énergétique de ce type de construction pour un usage tertiaire et dans un contexte de climat marocain.

Nous proposons dans ce qui suit une étude expérimentale sur des modèles de bâtiment à échelle réduite (cellule test extérieure), pour l'évaluation des performances thermiques de trois techniques passives de rafraîchissement de l'air appliquées aux toitures, dans un climat chaud et semi-aride. Ensuite, pour plus nous rapprocher d'un cas réaliste, nous considérons un bâtiment réel afin d'évaluer le potentiel d'économie d'énergie selon la technique passive prise en compte tout en évaluant le comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment, réalisée avec des matériaux biosourcés.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les protocoles adoptés pour mener nos différentes expérimentations et simulations thermiques dynamiques. Puis nous analysons l'effet engendré par les techniques passives sur le comportement thermique global de l'ambiance, afin d'évaluer la plus-value que ces techniques apportent au bâtiment une fois mises en place.

CHAPITRE II.

MÉTHODOLOGIE DES PROCÉDURES EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE

II.1. Introduction

Plusieurs techniques appliquées aux toitures pour le rafraîchissement passif des bâtiments, ont été choisies par le biais d'une revue bibliographique. Ces techniques passives ont été puisées dans la tradition nationale et internationale, notamment méditerranéenne, des constructions bioclimatiques. En effet, l'évaluation du comportement thermique de ces techniques nécessite une démarche expérimentale et numérique. La première démarche consiste à mener des expériences, pendant une durée précise, sur les techniques passives choisies dans des conditions climatiques réelles et ceci par l'intermédiaire des prototypes conçus à cet effet.

En effet, pour comprendre le comportement thermique de chaque technique passive, nous avons procédé, simultanément, à une étude comparative en plusieurs cellules test à échelle réduite qui sont identiques. Cette étude nous a permis de choisir la meilleure configuration que nous avons appliquée par la suite à la toiture d'un bâtiment à échelle réelle.

Quant à la démarche numérique, elle consiste à évaluer le comportement thermique de ces techniques pendant une année entière par l'intermédiaire d'un outil de simulation thermique dynamique et des données climatiques. Les résultats de la démarche expérimentale ont servi essentiellement à valider le modèle numérique du bâtiment réel afin qu'il soit le plus proche possible de la réalité.

II.2. Approche expérimentale

Pour évaluer le comportement thermique des techniques passives, nous avons adopté une approche expérimentale basée sur l'utilisation des cellules test à échelle réduite. Cette méthode a permis d'atteindre l'objectif premier à savoir une étude comparative de trois techniques passives appliquées aux toitures dans un climat chaud et semi-aride. Pour étudier l'impact de l'application de ces techniques passives dans la toiture d'un bâtiment réel, nous avons construit un bâtiment à échelle réelle dans lequel nous avons mené notre étude approfondie pour atteindre le second objectif à savoir une évaluation concrète du potentiel d'économie d'énergie de ces techniques passives sous une charge climatique semi-aride.

II.2.1. Etude expérimentale en modèle réduit

Afin de comparer les performances thermiques des techniques passives sélectionnées, quatre cellules test identiques ont été fabriquées. En effet, une cellule test a été fixée comme référence (toit sans aucun traitement) tandis que les toits des trois autres cellules test ont été munis d'une technique passive spécifique. L'étude du comportement thermique des trois techniques passives choisies a été faite d'une façon simultanée pour mieux évaluer leurs performances thermiques par rapport à une charge climatique unique pour toutes les cellules test.

II.2.1.1. Description des cellules test utilisées

Les quatre cellules test (Figure II.1) ont été conçues pour étudier plusieurs toits différents. Les parois constituant les cellules test sont en double tôle métallique galvanisée, et sont isolées par

une couche de la laine de verre de 40 mm d'épaisseur. Le tableau II.1 présente les différentes couches de ces parois. Chaque cellule test contient une porte étanche (partie hachurée) qui permet l'accès à l'intérieur comme il est indiqué sur la figure II.1. Seule la toiture est amovible, elle peut être changée en fonction de la technique passive ou de l'architecture que l'on désire étudier. Par ailleurs, quatre dalles identiques en 70 mm de béton armé ont été construites pour couvrir la partie supérieure des cellules test. Chaque dalle représente le toit d'une cellule test. Ces dalles font 70 mm d'épaisseur et ont été construites selon le processus présenté sur la figure II.2, ensuite elles ont été posées hermétiquement sur la structure métallique porteuse des cellules test (partie en bleu sur la figure II.1).

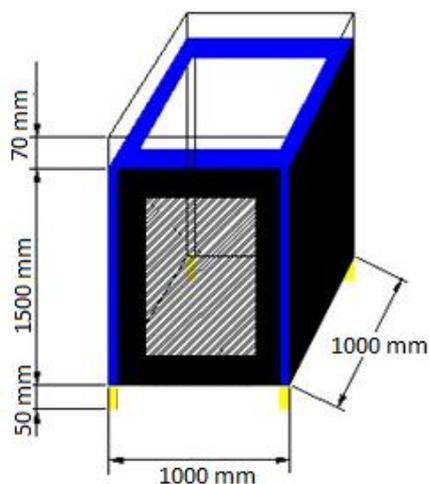


Figure II.1. Schéma 3D d'une cellule test

	Acier galvanisé	Laine de verre	Acier galvanisé
Plancher	2,3 mm	40 mm	1,6 mm
Parois verticales et porte	1,6 mm	40 mm	1,6 mm

Tableau II.1. Les couches constituant la structure fixe des cellules test

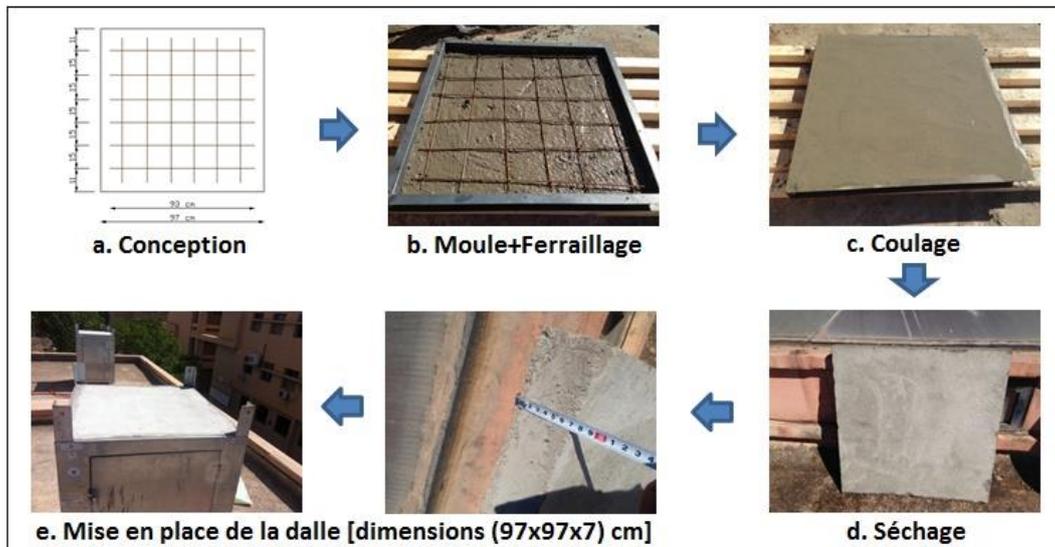


Figure II.2. Processus de construction des dalles constituant le toit des cellules test

Comme il est indiqué sur la figure II.3, les quatre cellules test ont été placées sur le toit du Centre National d'Études et de Recherches sur l'Eau et l'Énergie (CNEREE) pour s'assurer qu'elles ne sont pas influencées par les bâtiments du voisinage. En effet, une étude d'ombrage sur une année entière a été réalisée sur le logiciel Google SketchUp et les résultats ont affirmé que le positionnement des cellules test, indiqué dans la figure II.3, est correct.

Ensuite, deux couches de peinture blanche ont été appliquées sur les surfaces extérieures des quatre cellules test afin d'augmenter leur réflexion solaire (figure II.4).

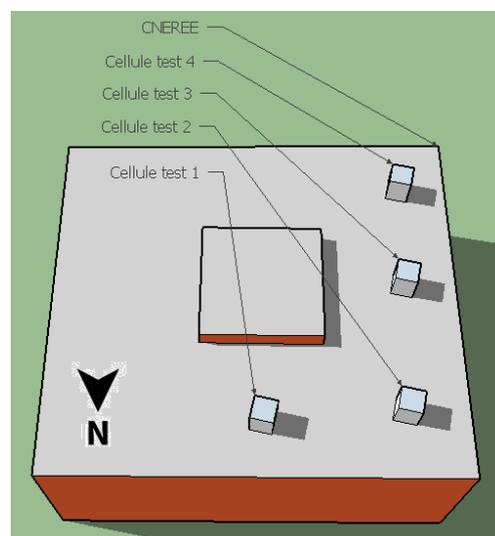


Figure II.3. Emplacement des quatre cellules test sur le toit du CNEREE

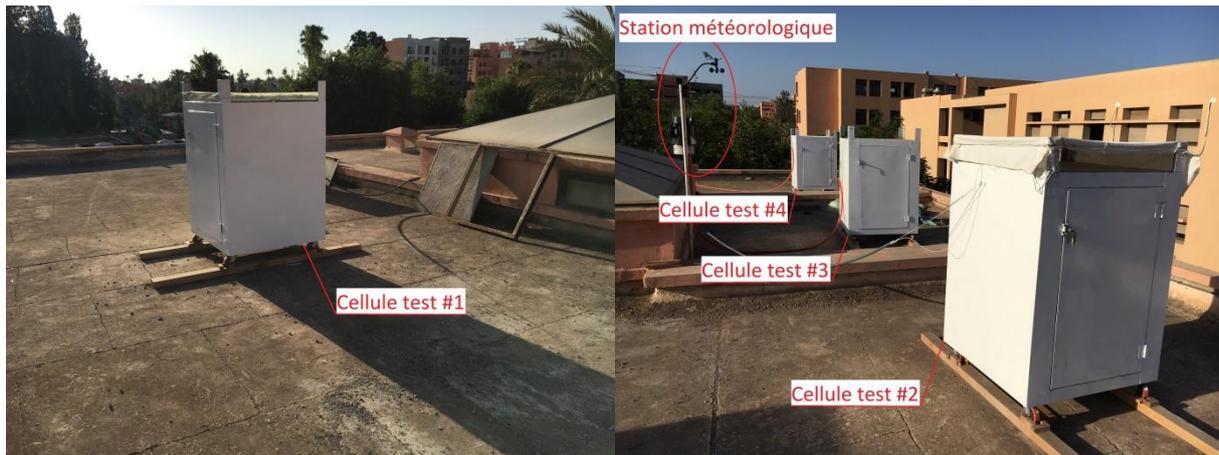


Figure II.4. Photo des cellules test installées sur le toit du CNEREE

II.2.1.2. Systèmes de mesure

Pour évaluer la performance thermique des techniques passives appliquées aux toitures des cellules test, nous avons installé plusieurs systèmes permettant de mesurer les grandeurs physiques tels que le flux de chaleur traversant les toits, les températures surfaciques des toits et la température de l'air intérieur. La figure II.5 montre l'emplacement du dispositif de mesure dans une cellule test. En effet, deux sondes PT100 (avec une précision de $0,5^{\circ}\text{C}$) ont été utilisées pour mesurer la température surfacique des faces intérieure et extérieure du toit. Ces sondes ont été insérées dans des petits trous remplis d'une pâte thermo-conductrice, et elles ont été protégées contre les rayonnements IR et solaire par un ruban adhésif blanc. Et pour mesurer le flux de chaleur qui traverse le toit, un fluxmètre HFP01 a été collé soigneusement sur la face interne de chaque toit. Ce fluxmètre mesure le flux de chaleur local perpendiculaire à sa surface avec une sensibilité de $50 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ et une précision de 3%. Par ailleurs, les 8 sondes PT100 et les 4 fluxmètres ont été liés à une chaîne d'acquisition de données programmée sur l'enregistrement des températures surfaciques et du flux de chaleur chaque minute. En outre, un Datalogger TESTO 174H a été accroché au milieu de la dalle et à mi-hauteur de la cellule test pour mesurer la température de l'air intérieur chaque 15 minutes avec une précision de $0,5^{\circ}\text{C}$.

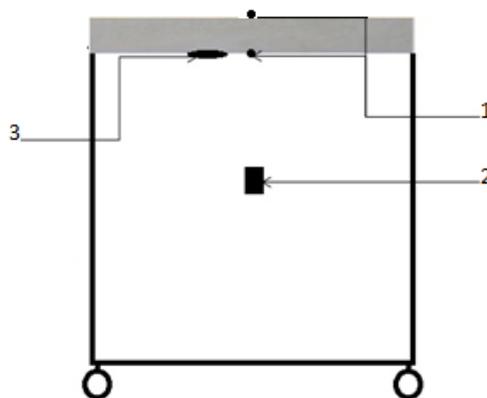


Figure II.5. Emplacement des systèmes de mesure dans une cellule test (1 and 2: sondes PT100; 2: datalogger TESTO 174H et 3: fluxmètre HFP01)

D'autre part, les données météorologiques ont été mesurées à l'aide d'une station météorologique DAVIS Vantage Pro2 (Figure II.6) installée au toit du CNEREE près des cellules test (Figure II.4). Cette station météo permet de mesurer, toutes les 30 minutes, la température de l'air, l'humidité et la pression de l'air ainsi que la vitesse et la direction du vent, le rayonnement solaire global sur un plan horizontal et les précipitations. Les erreurs de mesure sont respectivement de 0,5°C, 3%, 5% et 1 W.m⁻² pour la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent et le rayonnement solaire.



Figure II.6. Station météorologique DAVIS Vantage Pro2 et son branchement

II.2.1.3. Études préliminaires

Avant l'application des techniques passives choisies, plusieurs tests ont été effectués pour vérifier que les quatre cellules test ont le même comportement thermique et que les systèmes de mesure sont installés correctement. Ces tests ont été réalisés en juillet 2016. Dans un premier temps, nous avons vérifié que la température mesurée au centre de la dalle est uniforme sur toute la surface de la dalle. À cette fin, quatre autres sondes PT100 ont été collées sur la face extérieure de la dalle à différentes positions comme indiqué sur la figure II.7. Les mesures de la température surfacique extérieure de la dalle ont été effectuées pendant plusieurs jours. La figure II.8 rapporte les résultats pour la journée du 3 juillet 2016. Cette figure montre clairement que les températures de surface de la dalle, enregistrées par les cinq capteurs, sont pratiquement les mêmes pendant la journée. Une légère différence qui ne dépasse pas $0,5^{\circ}\text{C}$ a été observée de 10:00 à 18:00. On peut conclure que la température est uniforme sur toute la surface de la dalle à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à la précision des sondes PT100. Par conséquent, une seule sonde au centre de la dalle est utilisée pour mesurer ses températures de surface.

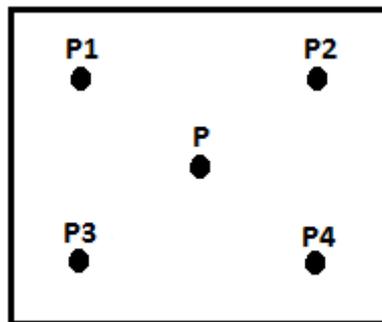


Figure II.7. Emplacement des sondes PT100 sur la face supérieure de la dalle

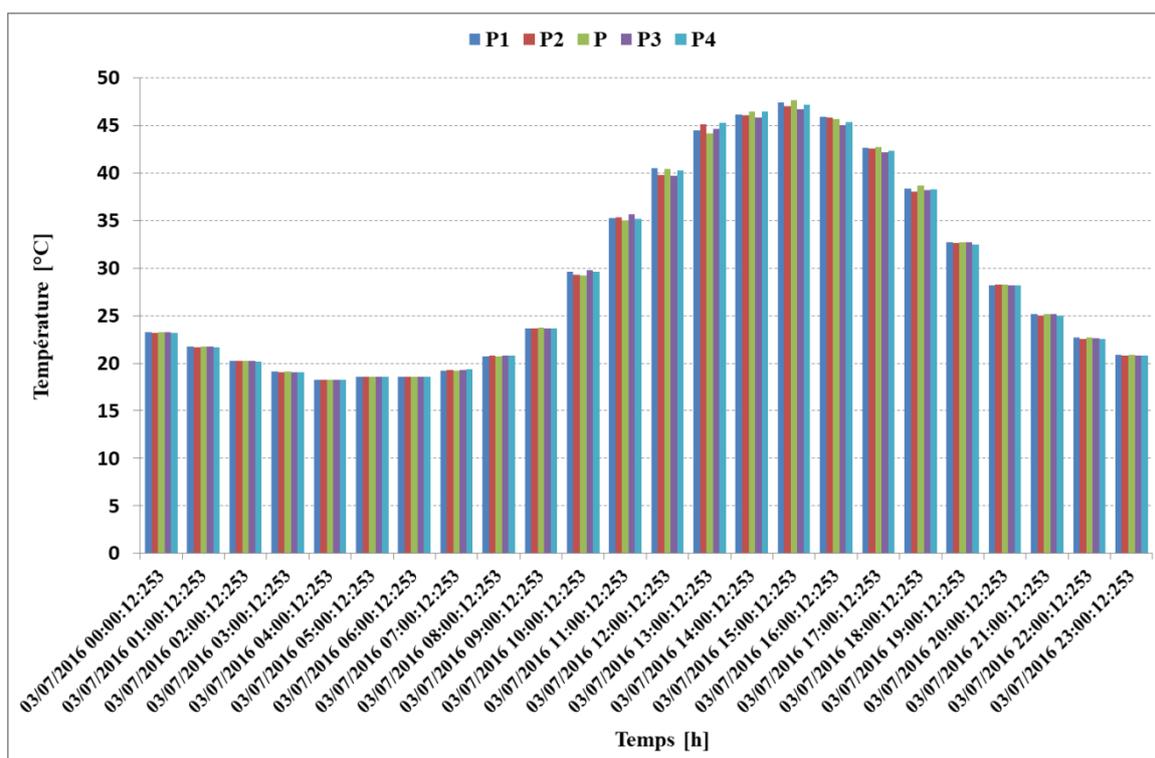


Figure II.8. Température moyenne de la surface de la dalle enregistrée à différentes positions

En outre, la similitude du comportement thermique des quatre cellules test a été soigneusement vérifiée. À titre d'exemple des résultats, l'évolution temporelle de la température moyenne de la surface interne des dalles des cellules test est présentée sur la figure II.9. Les résultats pour la cellule test #4 ne sont pas rapportés car la température de surface interne de la dalle est identique à celle de la cellule test #1. La figure II.9 montre que toutes les cellules test ont essentiellement le même comportement thermique à l'exception de quelques périodes (le matin ou l'après-midi). Cependant, ces légers écarts sont à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Les tableaux II.2 et II.3 présentent les différences des températures T_{SI} , T_{SO} et T_{int} (températures surfaciques interne et externe et la température de l'air intérieur) dans les cellules test #3 ou #2 par rapport à la cellule test #1. Ces différences sont moyennées pour chaque heure de l'ensemble de la période d'essai (du 15 au 20 juillet 2016). Il est clair que toutes les températures enregistrées sont identiques à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à la précision des sondes utilisées. Ainsi, on peut dire que toutes les cellules test ont le même comportement thermique.

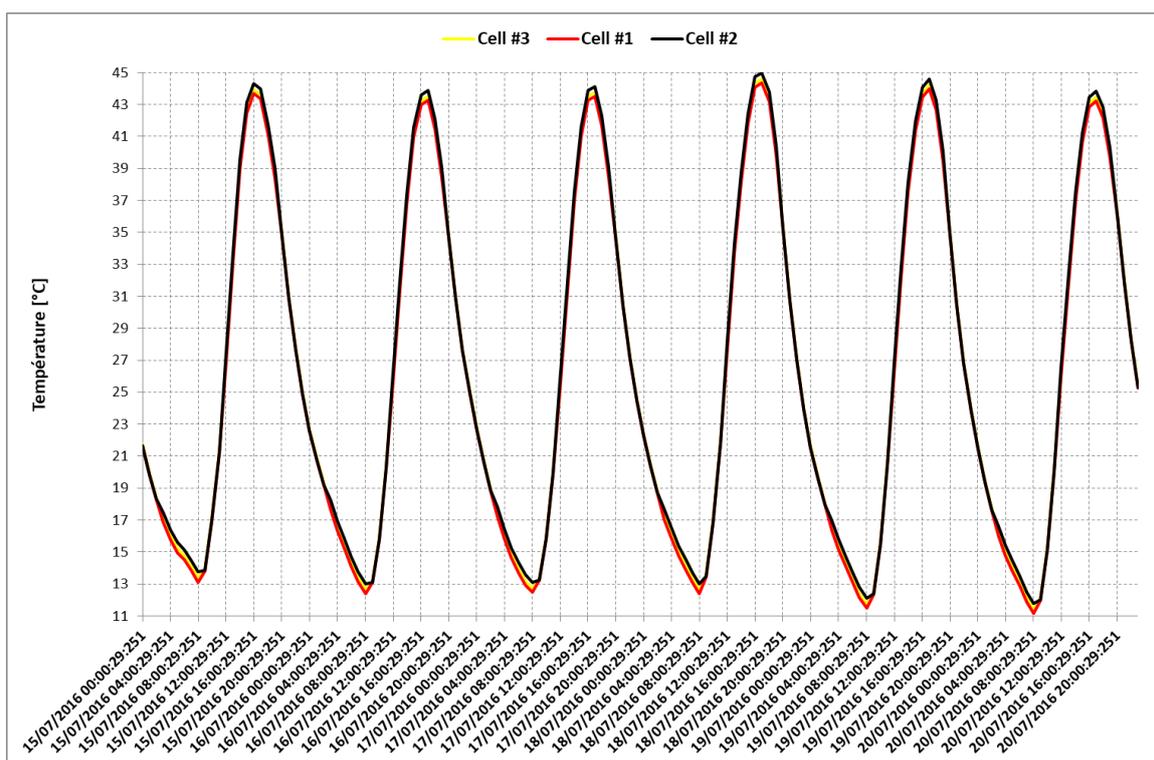


Figure II.9. Variation de la température T_{sl} des dalles des quatre cellules test

Time	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
ΔT_{int}	-0,3	-0,3	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3
ΔT_{SI}	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2
ΔT_{SO}	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1

Tableau II.2. Différence moyenne des températures T_{int} , T_{SI} et T_{SO} , entre la cellule test #3 et la cellule test #1.

Time	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
ΔT_{int}	+0,2	+0,2	+0,2	+0,3	+0,4	+0,4	+0,3	+0,3
ΔT_{SI}	+0,2	+0,2	+0,3	+0,4	+0,4	+0,5	+0,5	+0,3
ΔT_{SO}	+0,3	+0,3	+0,4	+0,4	+0,4	+0,3	+0,3	+0,2

Tableau II.3. Différence moyenne des températures T_{int} , T_{SI} et T_{SO} , entre la cellule test #2 et la cellule test #1.

II.2.2. Etude expérimentale en bâtiment réel

Les cellules test à échelle réduite ont été fabriquées pour comparer simultanément les techniques passives de rafraîchissement choisies. Celles-ci nous ont permis de comprendre le comportement thermique de chacune de ces techniques durant la période estivale. Afin d'évaluer la réelle plus-value qu'apportent ces techniques, celles-ci ont été appliquées à la toiture d'un bâtiment réel construit en matériaux locaux. Ce bâtiment a été construit récemment, en juin 2017, dans le cadre de la participation de l'Université Cadi Ayyad à la COP22 qui s'est tenue du 7 au 18 novembre 2016 à Marrakech. Celui-ci est situé à l'Annexe de la Faculté des Sciences Juridiques, Sociales et Economiques de l'Université Cadi Ayyad de Marrakech.

Les résultats de cette étude expérimentale ont été confrontés aux résultats des simulations thermiques dynamiques afin de valider le modèle conçu du bâtiment étudié. Ce modèle sert essentiellement de base pour évaluer la performance thermique pendant la période chaude puis froide, et calculer les charges de refroidissement et de chauffage nécessaires pour maintenir le bâtiment confortable thermiquement.

II.2.2.1. Description du bâtiment étudié

Le bâtiment étudié est un prototype d'une salle de classe habituellement située dans les zones rurales marocaines. Ce bâtiment a été conçu selon les normes du ministère marocain de l'éducation, avec une longueur de 8,6 m, une largeur de 6,8 m et une hauteur de 3 m. Ses murs sont porteurs, réalisés à partir de blocs de pisé de 53,7 cm d'épaisseur stabilisé avec 5% de ciment. Ces blocs ont été placés sur des murs de gabions remplis de galets de 1 m de profondeur. Le toit et le plancher du bâtiment sont faits d'une dalle alvéolaire en béton préfabriquée. Les dalles du plancher bas sont en contact direct avec le sol (Figure II.10). Le toit est isolé de l'intérieur par une couche de 8 cm de roseaux (Figure II.10). Le toit est également protégé de l'extérieur par un revêtement d'étanchéité de 4 mm et peint en blanc avec de la chaux. Les murs et le plafond ont été recouverts de l'intérieur par des plaques de plâtre de 1,3 cm d'épaisseur. De plus, la surface intérieure des murs était protégée par des panneaux de bois de 1 cm d'épaisseur et 1 m de hauteur (Figure II.12).



Figure II.10. La mise en œuvre du plancher bas (photo de gauche) et l'isolation du toit par des roseaux (photo de droite).

Le bâtiment dispose de 8 ouvertures dont une porte d'accès en bois massif de 2 m de hauteur et de 1,14 m de largeur. Quatre fenêtres sont situées dans la façade Nord-Ouest et 3 autres et la porte dans la façade Sud-Est. Les fenêtres font 1,14 m de hauteur et 0,8 m de largeur et sont fabriquées en simple vitrage avec un cadre en bois. Les fenêtres sont protégées par des volets persiennes orientables en bois. La dalle du toit dépasse les murs de 30 cm sur chacune des façades du bâtiment. Un effet d'ombrage sera donc présent selon l'heure de la journée en partie haute de ces façades (cf. figure II.11).



Figure II.11. L'emplacement des ouvertures sur la façade Sud-Est (à gauche) et sur la façade Nord-Ouest (à droite).

II.2.2.2. Méthodologie utilisée pour le monitoring

Le suivi expérimental du prototype consiste à mesurer les températures de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment pendant la période chaude et la période froide. A cette fin, 6 dataloggers TESTO 174H ont été suspendus au plafond à mi-hauteur (figure II.12) pour mesurer la température de l'air intérieur et l'humidité relative. Un autre datalogger a été placé à l'extérieur du bâtiment pour mesurer la température de l'air extérieur et l'humidité relative (Figure II.12). La température intérieure et extérieure ainsi que l'humidité relative ont été enregistrées toutes les 12 minutes. La précision des dataloggers est de 0,5°C pour la température et de 3% pour l'humidité relative.



Figure II.12. Emplacement des dataloggers à l'intérieur du bâtiment étudié (à gauche) et à l'extérieur du bâtiment dans un abri météo (à droite).

II.3. Approche numérique

Afin d'évaluer la performance thermique et énergétique des techniques passives choisies sur une année complète (saison froide et chaude), nous avons modélisé le bâtiment sur le logiciel commercial TRNSYS. Le modèle conçu sur ledit logiciel est validé par le biais des résultats de l'étude expérimentale.

Le logiciel TRNSYS et les composants utilisés dans la simulation sont décrits de façon succinctes en Annexe à la fin de ce manuscrit.

II.3.1. Modélisation du bâtiment sur TRNSYS

La modélisation du bâtiment en question a été réalisée en deux étapes principales et sur la base de plusieurs hypothèses. La première étape concerne la définition de la géométrie du bâtiment, et la deuxième étape consiste à créer le projet TPF (TRNSYS Project File).

Le bâtiment étudié a été considéré comme « mono-zone » sur la base d'une vérification expérimentale. En effet, la mesure de température de l'air intérieur dans six différentes positions dans le bâtiment a montré que les températures enregistrées sont pratiquement identiques comme il est indiqué sur la figure II.13. La différence maximale enregistrée est de 0,1°C en sachant que la précision de l'appareil de mesure (datalogger TESTO 174H) est de 0,5°C.

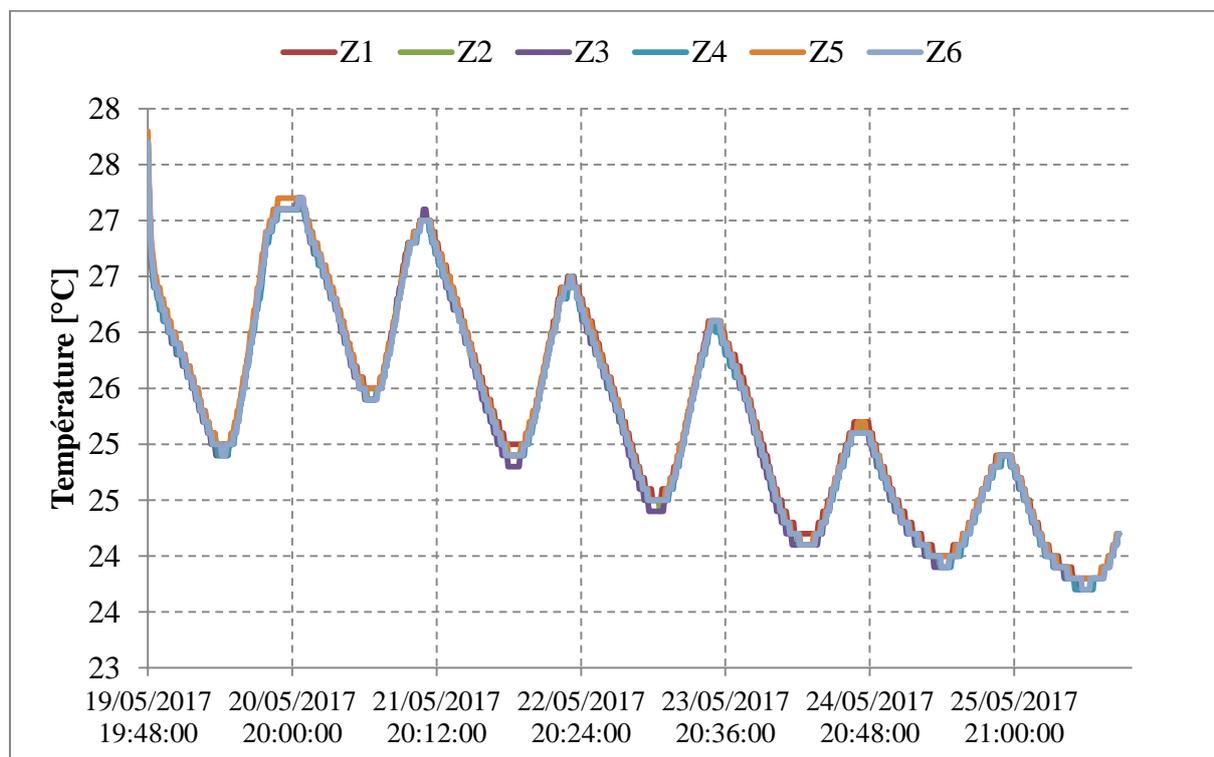


Figure II.13. Températures de l'air intérieur enregistrées dans six différentes positions dans le bâtiment

Pour créer la géométrie 3D du bâtiment (Figure II.14), nous avons utilisé le plug-in TRNSYS3D de Google SketchUp qui génère un fichier (*.IDF) contenant toutes les informations sur le bâtiment (parois, orientations, etc). Par ailleurs, nous avons importé ce fichier pour créer notre projet TPF. En effet, ce dernier consiste à définir les Types nécessaires pour la simulation du cas étudié ainsi que les interactions (liaisons physiques) entre eux. D'autre part, la simulation thermique dynamique du bâtiment est réalisée par le biais du Type 56 avec un pas de 1 heure. Ce dernier nécessite de nombreuses données du bâtiment (les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés, l'épaisseur de chaque couche constituant la paroi, etc.) qui sont fournis par TRNBUILD.

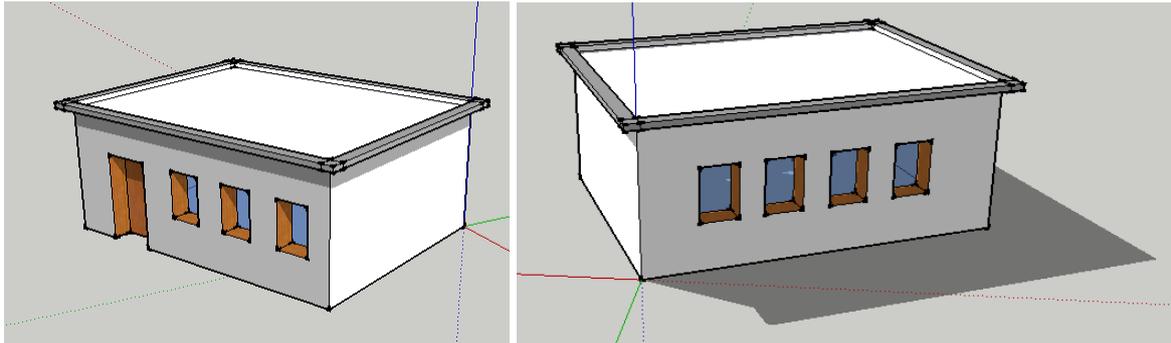


Figure II.14. La géométrie 3D du bâtiment étudié

II.3.2. Hypothèses de simulation

Afin d'évaluer le comportement, la charge et le confort thermiques à l'intérieur du bâtiment étudié, il est indispensable de prendre en considération plusieurs hypothèses menant à une simulation du bâtiment dans un état plus proche de la réalité et de son type d'usage (salle de cours). En effet, ces hypothèses concernent essentiellement les parois et les conditions à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment.

L'évaluation du comportement thermique du bâtiment est faite par le biais de la température opérative qui combine entre la température de l'air intérieur et la température moyenne radiante, elle est calculée à partir de l'équation II.1 [TRNSYS, 2010].

$$T_{op} = (h_c T_a + h_r T_r) / (h_c + h_r) \quad (2.1)$$

D'autre part, les consommations énergétiques du bâtiment sont calculées sur la base d'une température de consigne de 20°C en hiver et 26°C en été. Ces températures sont conformes à la norme ISO 7730 adoptée par le Maroc en 2010 [NM ISO 7730, 2010]. Cette norme fixe aussi l'humidité de confort en hiver à 55% et en été à 60%.

II.3.2.1. Données météorologiques

Dans les simulations thermiques dynamiques sur une année complète, nous avons utilisé un fichier météo de type TMY (Typical Meteorological Year) fourni par Meteonorm [Meteonorm, 2014]. Ses données sont plus représentatives par rapport à celles mesurées sur une année. En effet, la température de l'air extérieur, l'humidité et la vitesse du vent sont prises sur la période de 2000 à 2009, et les irradiances solaires sont prises sur une période de

20 ans, de 1985 jusqu'à 2005. Le fichier TMY utilisé contient les données suivantes : la température de l'air ambiant, l'humidité relative, le rayonnement solaire direct et diffus et la vitesse du vent.

II.3.2.2. Température et propriétés thermophysiques du sol

Le couplage entre le bâtiment et le sol est fait par le Type 77. Ce composant modélise la distribution verticale des températures du sol compte tenu de la température moyenne de surface du sol pour l'année qui est typiquement la moyenne annuelle de la température de l'air au lieu considéré selon [Bozonnet, 2005] et [Kusuda, 1965] (ANNEXE II). Cette température est supposée être égale à la température moyenne annuelle de l'air extérieur de Marrakech qui est de 20,3°C selon le fichier météo TMY.

Les propriétés thermophysiques du sol sont prises de [Sobhy et al, 2014] qui ont étudié les effets du couplage sol/bâtiment sur la performance thermique d'une maison située à Marrakech. Par conséquent, la conductivité thermique, la densité et la chaleur spécifique du sol ont été fixées à 1,28 W.m⁻¹.K⁻¹, 2000 kg.m⁻³ et 659,8 J.kg⁻¹.K⁻¹ respectivement.

II.3.2.3. Caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment

Les propriétés thermophysiques des roseaux sont mesurées en utilisant la méthode des boîtes au laboratoire EnR2E du CNEREE. Celles du revêtement d'étanchéité, des plaques de plâtre et de bois sont prises d'une base de données standard [RT2000]. Quant à la dalle en béton alvéolaire, ses propriétés thermophysiques sont prises de l'étude de [Pomianowski et al, 2011]. Le tableau II.4 présente les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés dans la construction du bâtiment étudié ainsi que leurs épaisseurs.

D'autre part, le coefficient de transmission thermique (U) des parois verticales a été mesuré in-situ à l'aide du kit *greenTEG U-value* selon la norme ISO 9869 [ISO 9869, 2014]. La valeur moyenne mesurée de ce coefficient est de 1,75 ± 0,09 W.m⁻².K⁻¹. Les coefficients U du toit et du plancher bas sont calculés par le Type 56 sur TRNSYS (Cf. Annexe). Le tableau II.5 présente les valeurs de U de chaque paroi du bâtiment.

Matériaux	Epaisseur (m)	Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Chaleur massique ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Bois*	0,05	0,23	1600	850
Plaques de plâtre*	0,013	0,25	1000	900
Revêtement d'étanchéité*	0,004	0,23	1000	1100
Panneau de roseaux**	0,08	0,0526±0,002	1400	250
Dalle en béton alvéolaire***	0,12	1,51	1000	1300

Tableau II.4. Propriétés thermophysiques des matériaux de construction utilisés *[RT2000], **Mesurées, ***[Pomianowski et al, 2011]

Parois	Coefficient de transmission U ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
Plancher bas	3,90
Murs verticaux	1,75 ± 0,09
Toit	0,52

Tableau II.5. Coefficients de transmission U de chaque paroi du bâtiment

II.3.2.4. Gains internes

En ce qui concerne la période d'occupation, l'ouverture des volets et les gains internes, les hypothèses suivantes sont retenues:

- Le bâtiment est occupé de 8h00 à 17h00 du lundi au vendredi. Le mois d'août est considéré comme un mois de vacances.
- 31 personnes sont présentes en même temps dans le bâtiment (salle de cours).
- 30 personnes sont considérées comme étant assises avec des activités légères (120W/personne) et une personne est considérée debout avec une activité légère (185W/personne) [ISO 7730, 2005].
- Les volets extérieurs sont ouverts pendant la période d'occupation pour l'éclairage naturel.

II.3.2.5. Autres hypothèses adoptées dans la simulation

- Le taux d'infiltration dans le bâtiment est pris égal à 0,5 vol/h.
- Les valeurs initiales de température et d'humidité de l'air sont respectivement fixées à 20°C et 50%.
- Les coefficients d'absorption solaire des surfaces externes des murs et du toit sont estimés à 0,75 et 0,22 respectivement.
- L'émissivité thermique des façades externes est prise égale à 0,9.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons consacré une première partie à la présentation détaillée du protocole expérimental adopté pour évaluer les performances thermiques des techniques passives choisies et appliquées aux toitures des différentes cellules test à échelle réduite qui ont été impactées in-situ par les conditions climatiques réelles de Marrakech.

Une seconde partie est dédiée à la description du protocole expérimental suivi pour évaluer la plus-value qu'apportent les techniques étudiées auparavant (à échelle réduite), une fois mis en place dans un bâtiment à échelle réel.

Ensuite, nous avons présenté les différentes hypothèses adoptées lors de la modélisation thermique du domaine sur le logiciel commercial TRNSYS. Ces hypothèses permettent d'être plus conforme à la réalité.

Nous allons aborder maintenant le chapitre 3. Celui-ci sera dédié à une analyse comparative des performances thermiques de trois techniques passives appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments dans des conditions climatiques réelles.

CHAPITRE III.

ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE EN MODÈLE RÉDUIT

III.1. Introduction

Ce chapitre présente l'évaluation expérimentale de trois techniques passives appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments dans le climat chaud et semi-aride de Marrakech. Celui-ci présente également une comparaison de la performance thermique de deux matériaux naturels très répandus à Marrakech, à savoir les roseaux et les fibres de palmier dattier.

Les procédures de cette étude sont décrites dans le chapitre précédent (section 1.1).

III.2. Description des techniques passives choisies

Trois techniques passives de protection thermique et solaire des toitures sont choisies: ombrage, isolation thermique élevée et peinture blanche réfléchissante. Chaque dalle des trois cellules test est équipée de l'une de ces techniques tandis que la dalle de la quatrième cellule test est maintenue à nu. Les détails de la mise en œuvre de ces techniques sont donnés dans le tableau ci-dessous III.1.

Technique (Cellule test)	Description
Référence, REF (#3)	Dalle nue
Peinture blanche, WP (#4)	Deux couches de peinture blanche de haute réflexion (coefficient d'absorption estimé, par simulation, à $0,23 \pm 0,02$).
Ombrage, SH (#2)	Toile blanche imperméable placée à 13 cm au-dessus de la dalle par le biais d'un support métallique.
Isolation thermique, EPS (#1)	Isolation thermique extérieure par 40 mm de polystyrène expansé recouvert d'une couche de gravier de 20 mm.

Tableau III.1. Détails de la mise en œuvre des techniques passives étudiées.

La technique de l'ombrage, appliquée à la dalle de la cellule test #2, est constituée par une toile blanche étanche à l'eau placée à environ 13 cm au-dessus de la dalle. Elle garantit l'ombrage de la dalle toute la journée (matin, après-midi et soir). Cependant, deux ouvertures de la toile d'ombrage dans le Nord et le Sud permettent une ventilation naturelle. La couleur blanche de la toile minimise l'absorption du rayonnement solaire. Quant à la technique de l'isolation thermique, appliquée à la dalle de la cellule test #1, elle est constituée de polystyrène expansé (EPS) de 40 mm d'épaisseur protégé par une couche de gravier gris de 20 mm d'épaisseur. La conductivité thermique de l'EPS est de $0,039 \pm 0,003 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (mesurée par la méthode des boîtes au Laboratoire EnR2E). Le choix de ce matériau isolant a été fait sur la base de plusieurs critères, notamment sa disponibilité dans le marché marocain, son coût et ses propriétés thermiques. Une étude d'optimisation a été également faite dans le but de choisir une épaisseur optimale de ce matériau. Plusieurs épaisseurs ont été simulées sur

l'outil TRNSYS (0 m, 0,02 m, 0,04 m, 0,06m, 0,08 m et 0,1 m) dont la référence est 0 m. La figure III.1 montre clairement que la différence de température de l'air intérieur pendant l'heure la plus chaude de la journée de simulation (12/04/2016 à 17:00 GMT+1) est plus grande lorsque nous passons d'une épaisseur de 0 m à 0,02 m (environ 4,5°C) et de 0,02 m à 0,04 m (environ 7,6°C). Quand l'épaisseur dépasse 0,04 m, la différence de température progresse de moins de 1°C. Ceci justifie l'épaisseur choisie qui est de 0,04 m.

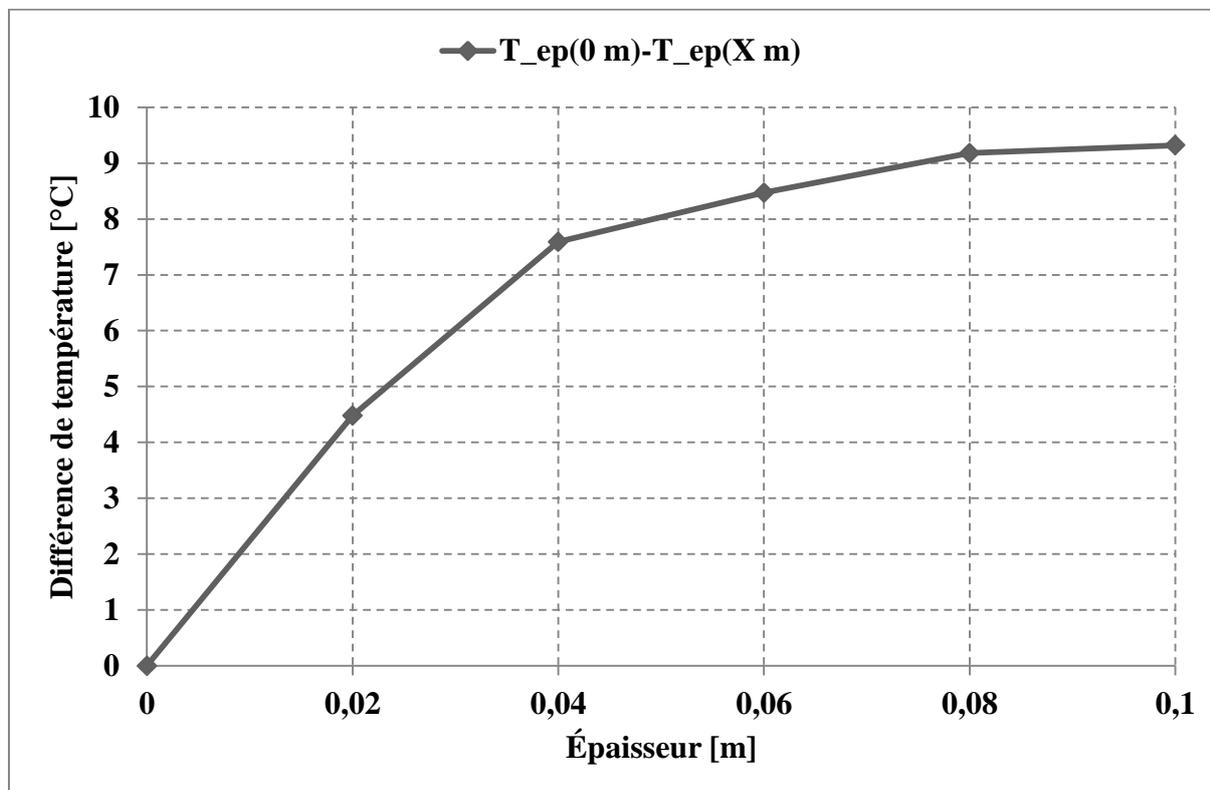


Figure III.1. Impact de l'augmentation de l'épaisseur du polystyrène sur la température de l'air intérieur

La technique de la peinture blanche, appliquée en deux couches à la dalle de la cellule #4, a conduit à un coefficient d'absorption estimé numériquement à $0,23 \pm 0,02$. La peinture, appliquée au début des mesures, n'a pas été renouvelée lors de la campagne de mesure pour pouvoir étudier l'effet de la dégradation de ses propriétés optiques sur le comportement thermique de la technique en question. La figure III.2 illustre les techniques passives étudiées telles qu'elles ont été appliquées.



Figure III.2. Photos des quatre cellules test avec les techniques passives. De gauche à droite et de haut en bas: cellule de référence avec dalle nue, dalle peinte en blanc, toit ombragé et toit isolé thermiquement de l'extérieur

III.3. Contexte géographique et climatique

Les cellules test ont été installées au toit du bâtiment du Centre National d'Etudes et de Recherches sur l'Eau et l'Energie (CNEREE) situé sur le campus de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech. La ville de Marrakech est située au centre ouest du Maroc, à $31^{\circ} 37' 48''$ Nord et $8^{\circ} 0' 0''$ Ouest à 450 m d'altitude et une superficie de 230 km². L'océan Atlantique est à 150 km de Marrakech, le désert est à un peu plus de 180 km et la montagne est à 75 km. Selon la classification climatique de Köppen-Geiger, le climat de Marrakech est de type BSh (climat chaud et semi-aride) [Kottek et al, 2006]. Et selon le règlement thermique de construction au Maroc [RTCM, 2014], la ville de Marrakech est située dans la zone climatique 5 (Figure III.3). En effet, son climat est principalement caractérisé par un été chaud et sec où les précipitations sont presque absentes et un hiver doux avec des températures moyennes de 7 à 20°C. La période chaude s'étend du mois de mai au mois d'octobre.

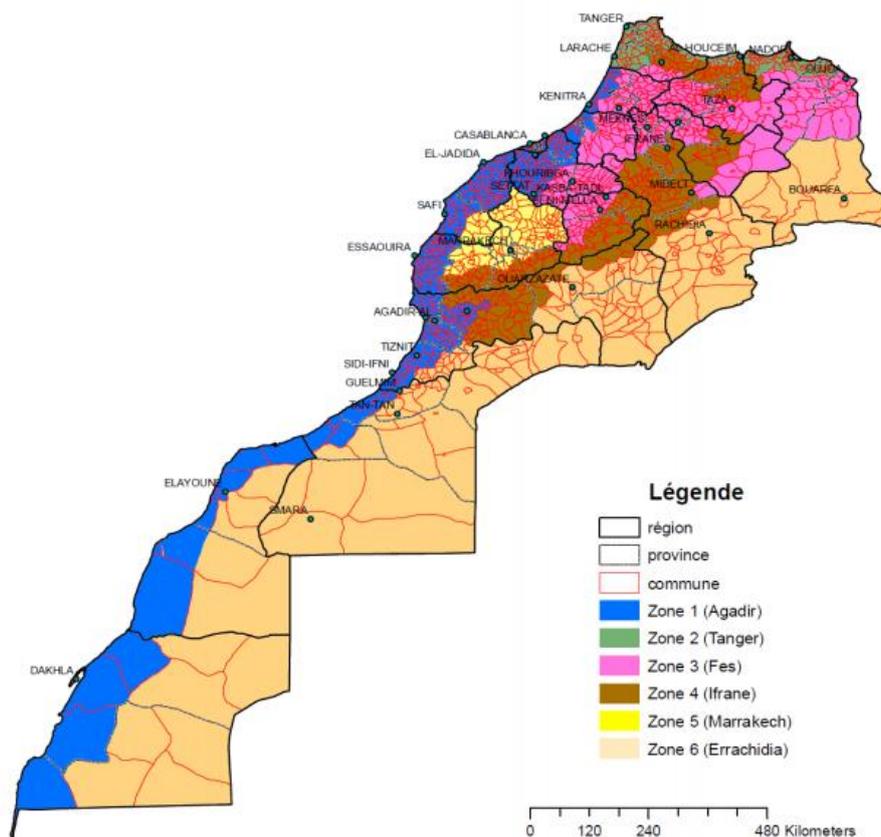


Figure III.3. Zonage climatique du Maroc adapté aux besoins du RTCM [RTCM, 2014]

Le tableau III.2 montre la moyenne journalière (T_{avg}), le maximum (T_{max}) et le minimum (T_{min}) de la température de l'air extérieure enregistrée et le rayonnement solaire global cumulé sur un plan horizontal pendant la journée (G_{sol}). Comme indiqué dans la section 1.1.2 du chapitre 2, ces données ont été enregistrées par une station météorologique installée à proximité des cellules de test.

Date	Tavg	Tmax	Tmin	Gsol (kwh/m ²)
10/08/2016	33,1	40,4	26,6	7,5
11/08/2016	30,3	39,1	22,1	7,5
12/08/2016	28,4	37,1	21,8	7,2
13/08/2016	29,5	37,9	22,8	6,5
14/08/2016	31,8	40,0	25,0	6,4
15/08/2016	31,8	38,1	26,5	5,1
16/08/2016	33,3	39,1	28,2	5,9
17/08/2016	32,3	38,6	27,3	6,4
18/08/2016	30,5	38,0	23,7	6,9
19/08/2016	29,1	37,2	22,6	6,8
20/08/2016	29,9	38,9	22,7	6,5
21/08/2016	31,7	39,9	24,7	6,5
22/08/2016	34,0	41,8	27,8	6,5
23/08/2016	31,1	39,1	24,4	6,6
24/08/2016	30,2	38,6	23,6	6,7
25/08/2016	29,3	35,9	22,7	5,9
26/08/2016	30,8	34,8	25,4	2,0
27/08/2016	32,8	39,7	27,4	3,5
28/08/2016	34,8	43,2	26,4	6,6
29/08/2016	34,1	41,7	27,4	5,8
30/08/2016	32,7	40,3	26,7	6,5
31/08/2016	28,9	36,3	23,4	6,5
01/09/2016	24,5	29,4	19,4	3,1
02/09/2016	27,5	32,0	22,2	3,0
03/09/2016	27,4	31,6	23,2	2,2
04/09/2016	30,3	35,9	25,8	3,2
05/09/2016	32,9	42,8	24,4	6,2
06/09/2016	33,8	44,1	26,9	5,6
07/09/2016	31,7	39,1	26,1	5,8

Tableau III.2. La moyenne journalière, le maximum et le minimum de la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire global cumulé sur un plan horizontal pendant la journée, enregistrés in situ pendant la campagne de mesure

III.4. Résultats

Pour évaluer les performances thermiques des techniques passives étudiées, les cellules tests ont été monitorées pendant 31 jours à partir du 8 août 2016 à 00:00 (GMT+1). Les résultats des deux premiers jours ne sont pas pris en compte dans l'analyse [Kachkouch et al, 2018].

III.4.1. Analyse de la température de l'air à l'intérieur des cellules de test

Il convient de souligner que la température de l'air intérieur dans les cellules test a été enregistrée à des fins de comparaison uniquement. Cette température ne représente pas les

conditions intérieures d'un bâtiment réel en raison de la structure de la cellule test et de ses petites dimensions, du faible rapport entre le toit et les murs et de l'absence d'ouvertures.

La figure III.4 présente la température de l'air extérieur et l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal pendant une campagne de mesure de 29 jours. On peut voir sur cette figure que la température de l'air extérieur varie entre 19,4°C et 44,1°C alors que le rayonnement solaire global varie entre 340 W/m² et 960 W/m². Pour des raisons de clarté, trois périodes de trois jours chacune sont identifiées pour l'analyse des performances thermiques des techniques passives étudiées. Ces périodes commencent respectivement le 10 août, le 1er septembre et le 5 septembre. La première période (10-12/08/2016) correspond aux jours les plus ensoleillés avec un rayonnement solaire global maximum supérieur à 925 W/m² et ciel dégagé, tandis que la température extérieure oscille entre 21,8-26,3°C et 37,1-40,8°C. Au cours de la deuxième période (1-3/09/2016), le ciel était principalement nuageux et le rayonnement solaire maximal se situe entre 340 W/m² et 562 W/m², tandis que la température extérieure varie entre 19,4 et 23,4°C et 29,4-31,9°C. Enfin, le ciel était partiellement nuageux durant la troisième période (5-7/9/2016) avec un rayonnement solaire global variant de 846 à 884 W/m², alors que la température de l'air extérieur variait entre 26,1-27,4°C et 39,1- 44,1°C.

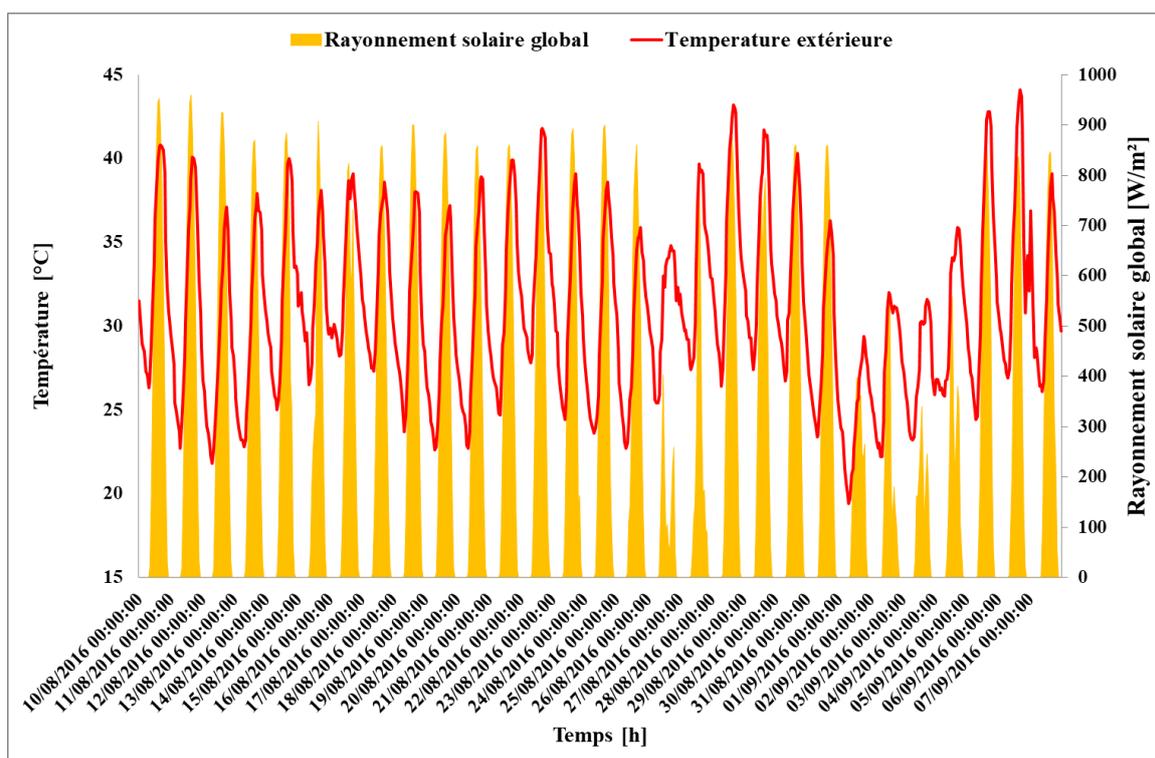


Figure III.4. Evolution de la température de l'air extérieur et du rayonnement solaire global sur un plan horizontal

Les figures III.5.a-c présentent la température de l'air enregistrée à l'intérieur des trois cellules test dont les toits sont traités avec les techniques passives étudiées ainsi qu'à l'intérieur de la cellule test de référence. La température de l'air extérieur est également indiquée. Les figures III.5.a-c montrent que toutes les techniques étudiées procurent une réduction de la température de l'air intérieur comparativement à la cellule de référence. Cette réduction, qui dépend du climat, est maximale pendant les après-midi. La plus forte réduction de la

température de l'air intérieur est observée pendant les jours les plus ensoleillés et les plus chauds, comme on peut le voir sur les figures III.5a et III.5c, respectivement. La figure III.5a montre clairement que l'isolation thermique du toit (EPS) conduit à la température de l'air intérieur la plus basse pendant l'après-midi et à la température la plus élevée pendant la nuit et le matin. L'isolation thermique empêche la chaleur due au rayonnement solaire direct incident sur le toit d'entrer dans la cellule test tout en gardant l'air intérieur chaud pendant la nuit. La technique de peinture blanche (WP) conduit à la température de l'air intérieur avec un comportement similaire à l'exception des périodes nocturnes. En effet, pendant la nuit et les premières heures du matin, la température de l'air intérieur de la cellule WP est essentiellement similaire à celle de la cellule de référence (REF). La différence entre ces deux températures est inférieure à $0,2^{\circ}\text{C}$, ce qui indique que les basses températures de l'air enregistrées à l'intérieur des cellules WP et REF sont principalement dues aux pertes de chaleur à travers le toit. Pendant les jours nuageux (figure III.5b), les températures de l'air intérieur des cellules avec des techniques passives ont un comportement similaire, sauf pour les périodes nocturnes et les premières heures du matin. Comme expliqué ci-dessus, durant ces périodes, avec une faible température de l'air extérieur, l'air intérieur des cellules WP et REF est rafraîchi par des pertes thermiques à travers le toit. Le voile d'ombrage de la cellule SH réduit ces pertes de chaleur en réduisant le refroidissement du toit par convection et rayonnement (refroidissement radiatif).

La figure III.5c, qui correspond aux derniers jours de la campagne de mesure, montre que le comportement thermique de la cellule WP est assez différent de celui des premiers jours (figure III.5a). En effet, la température de l'air intérieur des cellules WP, au cours des derniers jours du monitoring, est supérieure à celle des premiers jours. Ceci est dû à l'accumulation de poussière sur le toit de la cellule WP conduisant à la dégradation des propriétés optiques de la peinture blanche. Par conséquent, la température de l'air intérieur de la cellule WP est pratiquement identique à celle de la cellule SH pendant le jour et le soir. De plus, dans la nuit du 6 au 7 septembre, la température intérieure de la cellule WP est supérieure à celle de la cellule REF, contrairement aux nuits précédentes. En effet, la poussière accumulée sur le toit de la cellule WP a réduit sa capacité de refroidissement radiatif. Il convient de mentionner que le toit du WP n'a pas été nettoyé et que sa peinture n'a pas été renouvelée pendant la période de l'étude expérimentale. De plus, on peut voir que le refroidissement radiatif dans la cellule WP est plus efficace lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à 30°C . Lorsque cette température est dépassée dans la nuit du 6 au 7/9/2016, la température de l'air intérieur de la cellule WP est supérieure d'environ 1°C à celle de la cellule REF. Cela est dû, d'une part, à la température relativement élevée du ciel et, d'autre part, à la dégradation de l'émissivité de la dalle peinte en blanc. Cette surchauffe est encore accentuée dans les cellules SH et EPS pendant la même période.

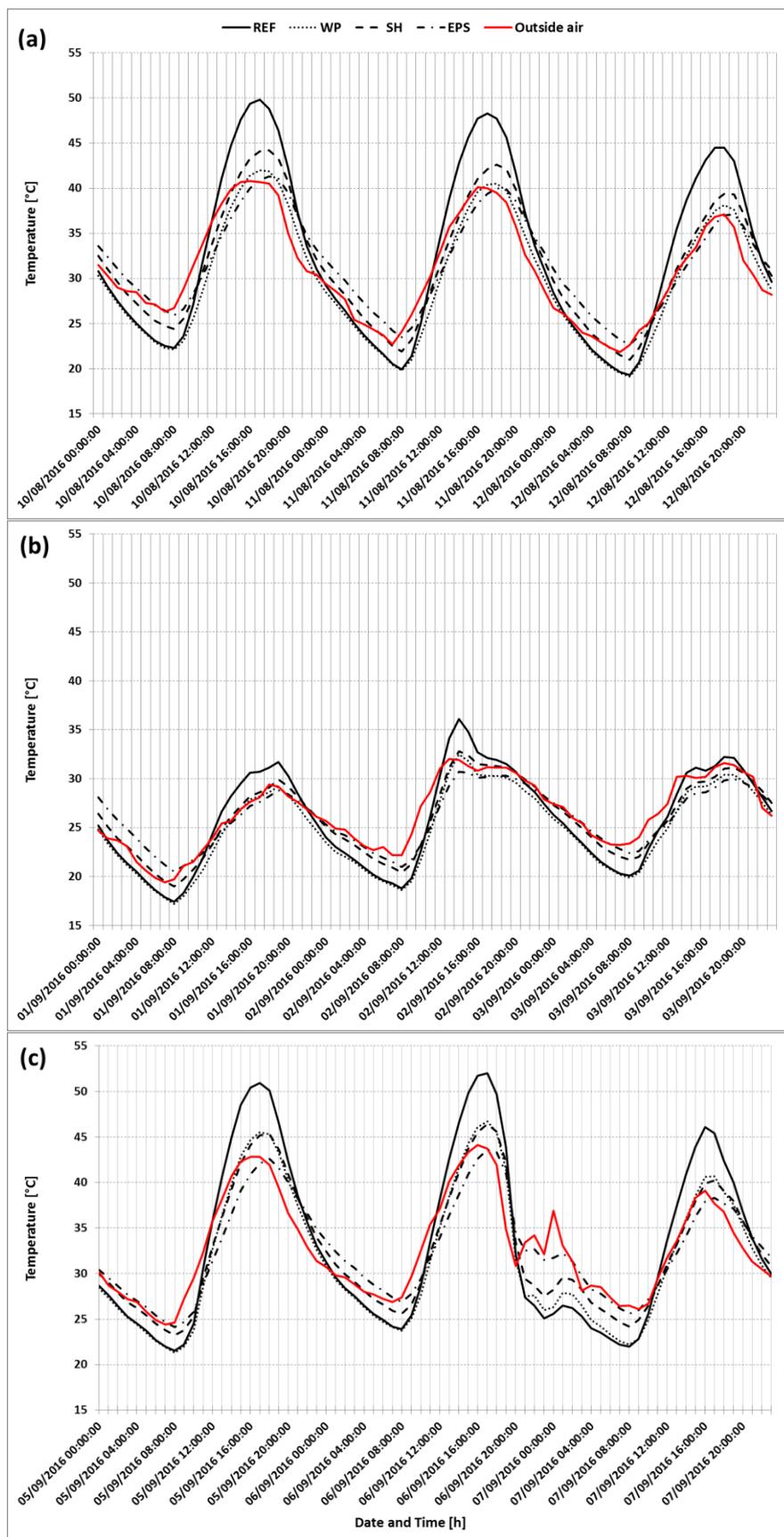


Figure III.5. Températures de l'air extérieur et intérieur enregistrées pendant la période la plus ensoleillée (a), nuageuse (b) et la plus chaude (c)

Le tableau III.3 présente la réduction moyenne de la température de l'air intérieur des cellules test avec différentes techniques passives par rapport à la cellule REF à toit nu. Ces réductions sont calculées sur toute la période du monitoring sauf pour la technique WP. Comme décrit ci-dessus, la performance de cette technique diminue avec le temps. Ainsi, la réduction correspondante de la température de l'air intérieur est calculée sur les trois premiers jours du monitoring (ligne a du tableau III.3) et les trois derniers jours du monitoring (ligne c du tableau III.3). Le tableau III.3 montre que la technique WP fournit la réduction la plus élevée de la température de l'air intérieur des cellules. La réduction moyenne obtenue par cette technique au cours des trois premiers jours du monitoring est de 6,5°C, tandis que les réductions correspondantes induites par les techniques EPS et SH sont respectivement de 5,5°C et 3,7°C. De plus, la réduction de la température de l'air intérieur des cellules induite par ces techniques a atteint respectivement 7,7°C, 6,9°C et 4,8°C. Cependant, une diminution drastique de la performance de la technique WP est observée au cours des trois derniers jours du monitoring, la réduction moyenne est passée de 6,5°C à 4,4°C. Cette baisse de performance est causée par l'augmentation du coefficient d'absorption de la dalle peinte en blanc qui est due à l'accumulation de poussières. Il est intéressant de noter, qu'au cours des trois derniers jours du monitoring, la technique WP conduit à une réduction similaire à celle de la technique SH.

De plus, la réduction de la température de l'air intérieur dépend fortement du rayonnement solaire. La réduction maximale passe de 9,4°C à 5,4°C pour la technique EPS et de 6,7°C à 3,3°C pour la technique SH le 11/8/2016 (jour le plus ensoleillé) et le 2/9/2016 (jour nuageux) respectivement.

Heure		12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
WP	a	4,4	5,7	6,8	7,4	7,7	7,6	6,8	5,7
	c	3	4,2	5	5,5	5,6	5,1	4,1	2,7
SH		2,3	3,6	4,5	4,8	4,7	4,2	3,4	2,2
EPS		3,1	5	6,4	6,9	6,9	6,4	5,4	3,8

Tableau III.3. Réduction moyenne de la température de l'air intérieur par rapport à la cellule REF au cours de la période du monitoring pour les techniques SH et EPS et, pendant les périodes 10-12/08/2016 (a) et 5-7/9/2016 (c), pour la technique WP

III.4.2. Analyse de la température des surfaces de la dalle des cellules test

La température de surface de la dalle de toit est un paramètre important qui influence sur le confort thermique intérieur. En particulier, la température du plafond de la cellule test influe la température de l'air intérieur. Ainsi, la réduction de la température du plafond de la cellule test améliorera certainement le confort thermique intérieur. Les figures III.6 et III.7 montrent la variation de la température de la surface externe des dalles (T_{SO}) et la température des plafonds (T_{SI}) des quatre cellules test pendant les trois périodes typiques de la campagne mesure. La température de l'air extérieur et le rayonnement solaire global sur un plan horizontal sont également présentés sur ces figures.

Les figures III.6.a-c montrent clairement que la cellule EPS a la température de surface externe de dalle la plus basse pendant les après-midi et la température la plus élevée pendant

la nuit et le matin. En effet, l'isolation thermique est la technique la plus efficace pour protéger la dalle du toit contre le rayonnement solaire. Les techniques WP et SH ont conduit à la même température de surface externe de dalle pendant les après-midi; sauf que WP fournit la valeur la plus basse de cette température. Cependant, tard dans l'après-midi, la toile d'ombrage garde la surface externe de la dalle de la cellule SH plus chaude tandis que la technique WP refroidit la surface externe de la dalle. Mais la performance de cette technique diminue pendant les derniers jours du monitoring, comme on peut le voir sur la figure III.6c. En effet, comme indiqué auparavant, l'accumulation de poussière sur la dalle de la cellule WP augmente son coefficient d'absorption et par conséquent sa température de surface externe. De plus, la figure III.6 montre que, du fait des propriétés de refroidissement radiatif de la peinture blanche, la température de surface externe de la dalle de la cellule WP est légèrement inférieure à celle de la cellule REF pendant la nuit, sauf le dernier jour de monitoring (Figure III.6c).

En ce qui concerne la température du plafond, les figures III.7.a-c montrent que la technique WP conduit à la valeur la plus basse de cette température toute la journée. Cependant, durant les derniers jours du monitoring (Figure III.7c), cette température prend les valeurs les plus élevées pour la technique WP pendant les après-midi, en raison de la dégradation des propriétés optiques de la peinture blanche. En outre, les valeurs les plus élevées de la température du plafond des cellules test ont été enregistrées pour la technique EPS sauf pour les après-midi, où la température du plafond de la cellule SH est plus élevée. Mais pendant les jours nuageux (figure III.7b), la technique EPS correspond aux valeurs les plus élevées de la température du plafond pendant toute la journée.

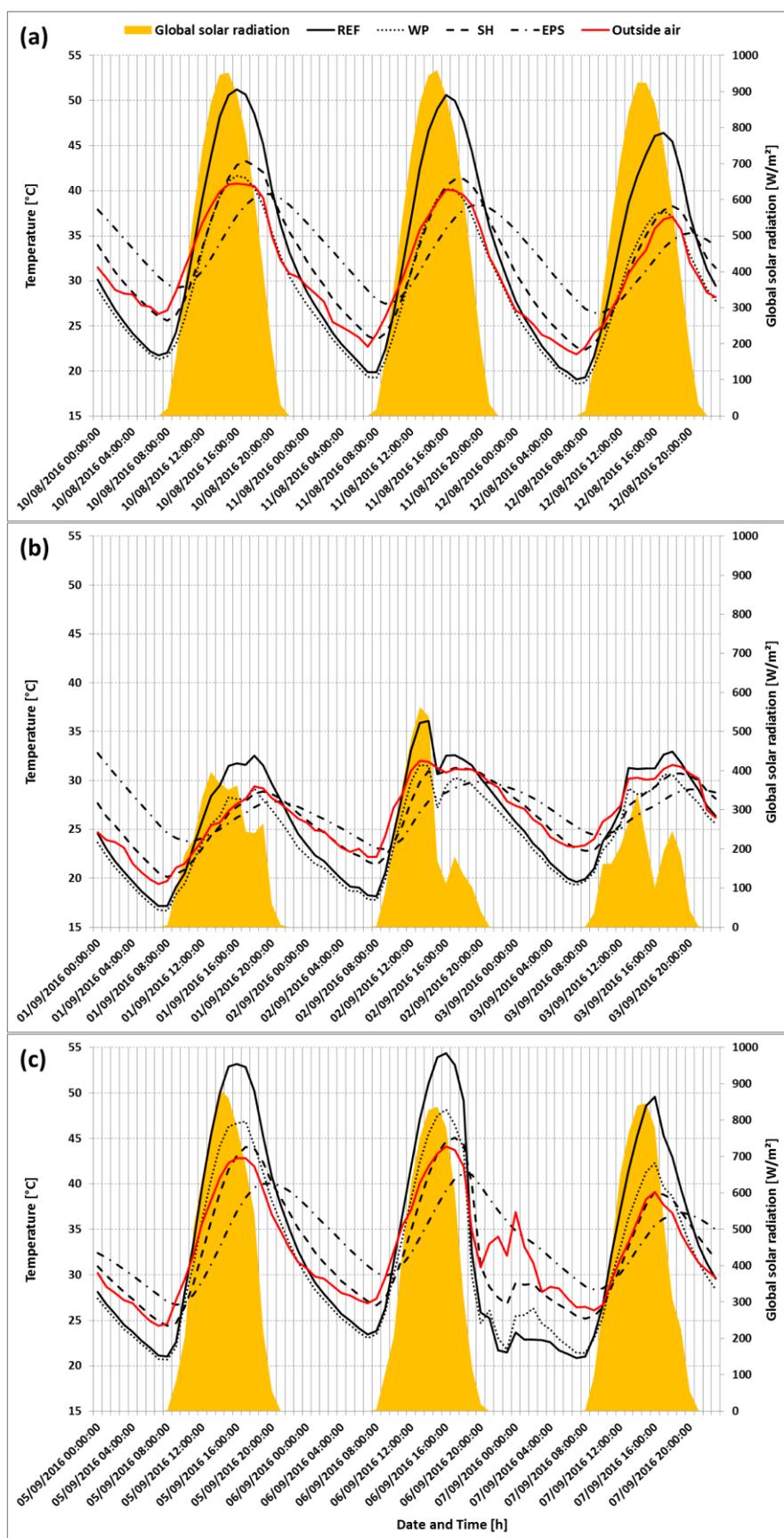


Figure III.6. Températures de la surface externe des dalles des quatre cellules test enregistrées pendant la période la plus ensoleillée (a), nuageuse (b) et la plus chaude (c)

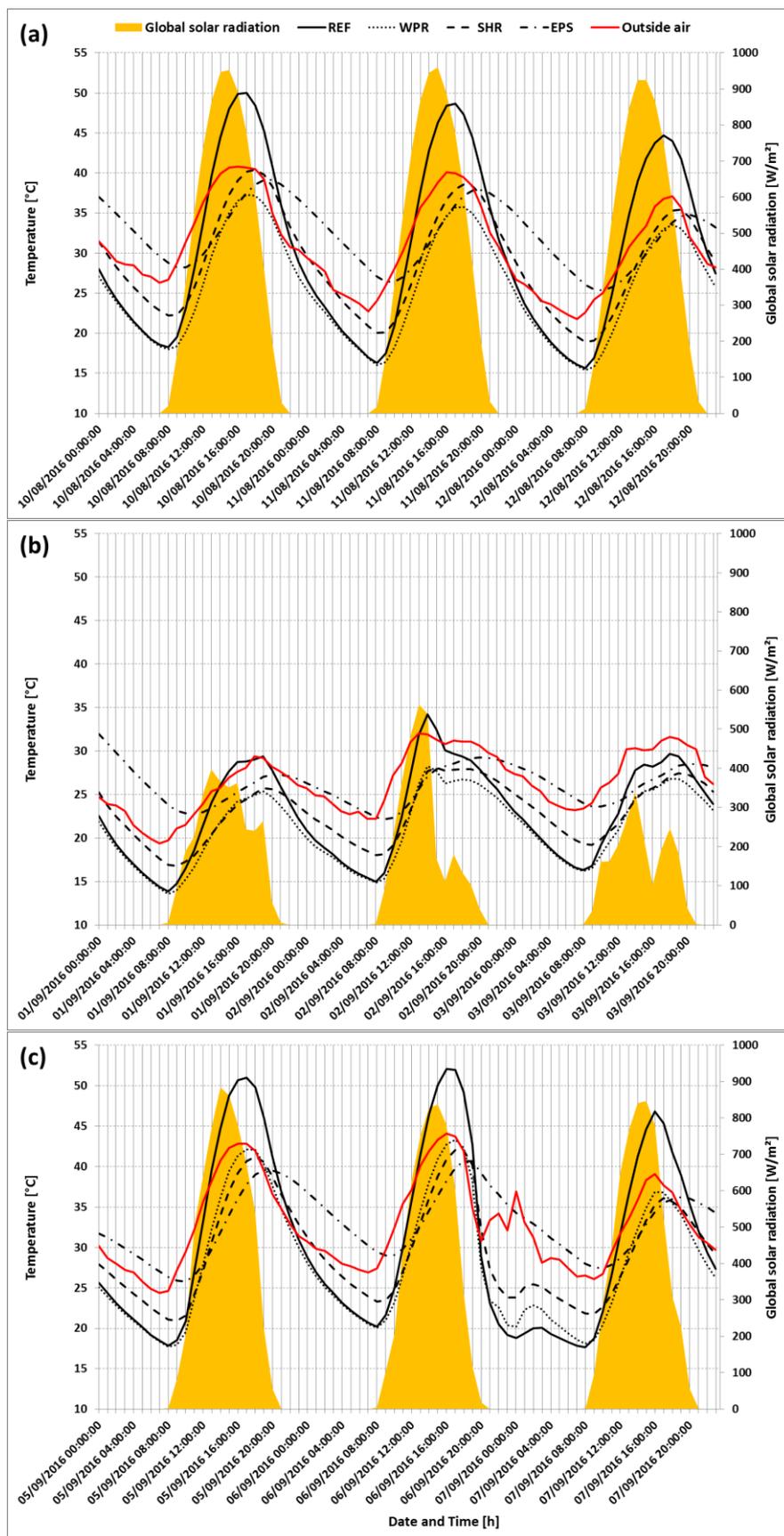


Figure III.7. Températures de plafond dans les quatre cellules test enregistrées pendant la période la plus ensoleillée (a), nuageuse (b) et la plus chaude (c)

Les tableaux III.4 et III.5 présentent la réduction de la température des surfaces externe et interne (plafond) des dalles pour les techniques passives étudiées par rapport à la cellule test de référence (REF). Ces réductions sont moyennées sur toute la période du monitoring à l'exception de la technique WP, dont la moyenne a été calculée sur les trois premiers jours (10-12/8, lignes a des tableaux III.4 et III.5) et les trois derniers jours du monitoring (5-7/9, lignes c dans les tableaux III.4 et III.5). Les réductions les plus importantes de la température de surface de la dalle ont été enregistrées dans la cellule WP pour le plafond et dans la cellule EPS pour la surface externe. En effet, la réduction moyenne de la température de surface externe de la dalle est respectivement de 8,8°C, 8,1°C et 5,9°C pour les cellules EPS, WP et SH. Cependant, cette réduction moyenne passe à 5,3°C dans la cellule WP pour les trois derniers jours du monitoring. Compte tenu de la température du plafond, la réduction moyenne est respectivement de 11°C, 7,1°C et 6,9°C dans les cellules WP, EPS et SH. Cette réduction moyenne passe à 7,6 dans la cellule WP pendant les trois derniers jours du monitoring. Il est clair que le toit peint en blanc a les performances thermiques les plus élevées en ce qui concerne la température du plafond. La réduction de la température de plafond procurée par la technique WP a atteint 13°C relativement à celle de la cellule test de référence. En outre cette réduction a atteint 9,9°C et 8,9°C pour les techniques EPS et SH respectivement.

Heure		12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
WP	a	5,6	7,2	8,6	9,1	9,5	9,3	8,4	6,8
	c	3,8	4,9	5,9	6,8	6,7	6,1	5,2	3,3
SH		5,3	7,1	7,8	7,6	7,3	6,2	4,7	1,5
EPS		6,7	9,8	11,3	11,5	11,2	9,7	7,5	2,9

Tableau III.4. Réduction moyenne de la température de la surface externe de la dalle par rapport à la cellule REF sur la période du monitoring pour les techniques SH et EPS et sur les périodes du 10 au 12/08/2016 (a) et du 5 au 7/9/2016 (c) pour la technique WP

Heure		12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
WP	a	7,6	10	11,8	12,7	13	12,4	11,1	9,4
	c	5,4	7,2	8,6	9,4	9,5	8,7	7	5
SH		4,6	7	8,4	8,9	8,6	7,7	6,1	4
EPS		2,7	6,4	8,9	9,9	9,7	8,7	6,7	3,8

Tableau III.5. Réduction moyenne de la température de plafond par rapport à la cellule REF sur la période du monitoring pour les techniques SH et EPS et sur les périodes du 10 au 12/08/2016 (a) et du 5 au 7/9/2016 (c) pour la technique WP

Ce qui précède permet de conclure que la peinture blanche de la dalle du toit est la technique de refroidissement la plus efficace. La dégradation des propriétés optiques de cette technique (WP) peut être corrigée en nettoyant (car les pluies sont peu fréquentes été comme hiver) et en renouvelant la peinture de temps en temps. Cependant, comme l'isolation thermique est obligatoire pour réduire les pertes de chaleur à travers le toit en hiver, il peut être intéressant de combiner les techniques WP et EPS.

En analysant les températures de surface interne (plafond) et externe de la dalle de la cellule EPS, on remarque que ces températures ont un déphasage horaire moyen d'environ 3 heures

par rapport à la température de l'air extérieur (figures III.6 et III.7). Ce déphasage est quasi nul pour la cellule REF et d'environ 1 heure pour les cellules WP et SH. Le plus grand déphasage horaire correspondant à la cellule EPS est essentiellement dû à la couche de gravier qui recouvre le panneau de polystyrène.

III.4.3. Analyse des flux de chaleur à travers la dalle des cellules test

La principale raison derrière l'utilisation des techniques de protection solaire est de réduire les gains solaires traversant les parois. Il est donc intéressant d'analyser le flux de chaleur à travers les dalles de toit des quatre cellules test. Les figures III.8.a-c présentent le flux de chaleur enregistré à la surface intérieure des dalles. Le rayonnement solaire global reçu par le toit des cellules test est également rapporté. Le flux de chaleur enregistré évolue entre 0 et environ 207 W/m². Il peut être négatif pendant la nuit (non représenté sur les figures III.8.a-c). Les valeurs négatives indiquent les pertes de chaleur de l'air à l'intérieur des cellules à travers leurs dalles. Il a été soigneusement vérifié que ces valeurs négatives correspondent à une période où la température du plafond est supérieure à celle de la surface externe de la dalle. La figure III.8a montre que le flux de chaleur à travers la dalle des cellules est toujours positif sauf pour la cellule REF pendant quelques courtes périodes de nuit. En effet, en raison du rayonnement solaire élevé, le flux de chaleur pénètre dans les cellules test toute la journée.

De plus, la température de l'air intérieur de la cellule REF a atteint des valeurs supérieures à 45°C (Figure III.5a). Les figures III.8b et III.8c montrent que le flux de chaleur à travers la dalle de la cellule REF est négatif pendant de courtes périodes où sa température de l'air intérieur atteint 36,1°C (Figure III.5b) et environ 50°C (Figure III.5c). De plus, le flux de chaleur à travers les dalles des cellules WP et SH est négatif pendant une courte période du 6 septembre (Figure III.8c) car la température de l'air intérieur de ces cellules dépasse 46°C, comme on peut le voir dans la figure III.5c.

Le flux de chaleur enregistré à la surface intérieure de la dalle peut être estimé par la relation suivante:

$$q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{T_{SO} - T_{SI}}{e}$$

Il a été vérifié que le flux de chaleur calculé a la même allure que le flux mesuré. En conséquence, le comportement du flux de chaleur enregistré peut s'expliquer par celui de la T_{SO} et de la T_{SI} représentées sur les figures III.6 et III.7. La figure III.8 montre que le flux de chaleur, à travers la dalle de la cellule REF, enregistré est maximum à 11:00. En effet, à cet instant, la différence de température de la surface extérieure et intérieure de la dalle prend sa valeur la plus élevée, comme on peut également le voir sur les figures précédentes III.6 et III.7 (p68 et p69 respectivement).

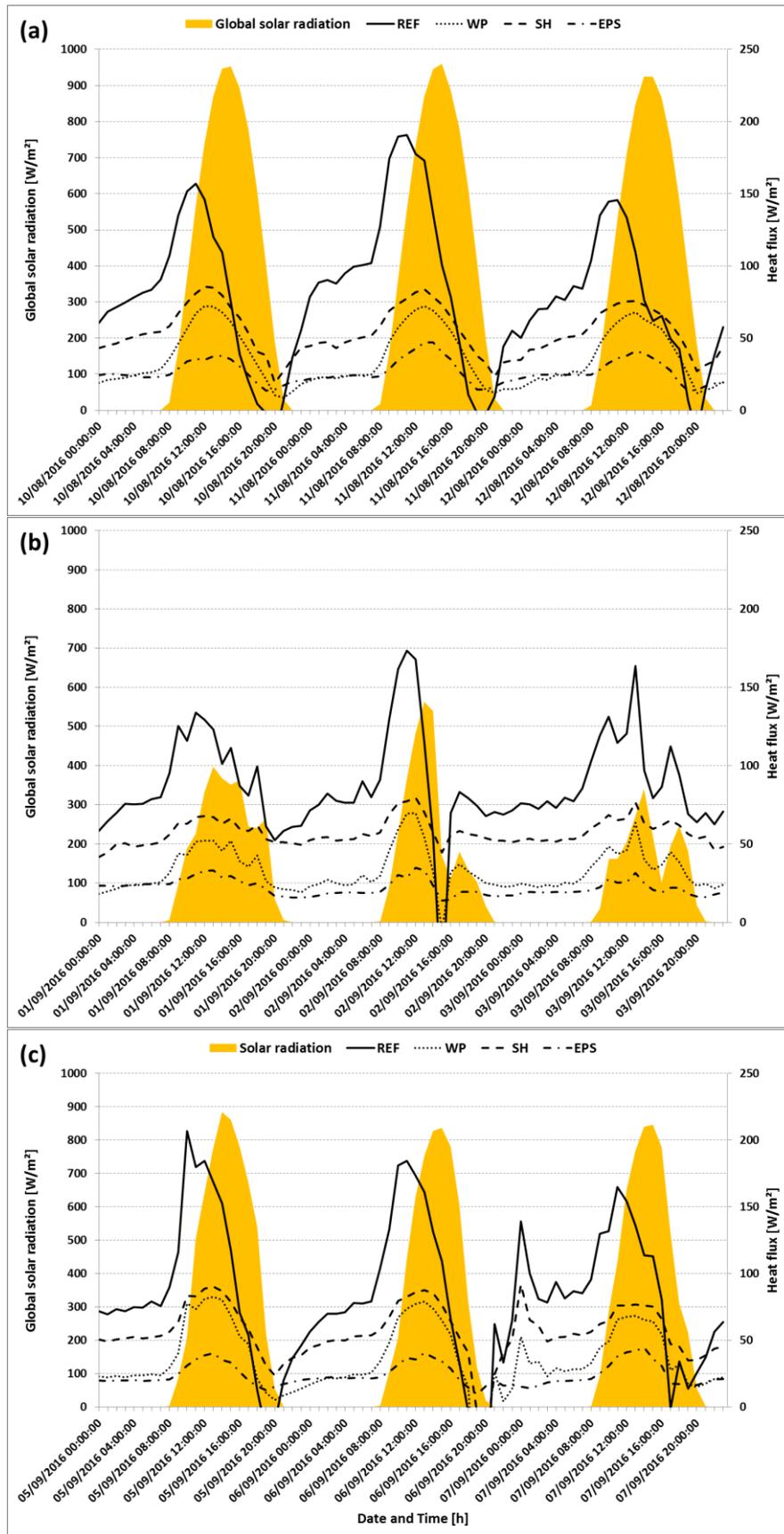


Figure III.8. Flux de chaleur à travers la dalle des cellules test enregistrés pendant la période la plus ensoleillée (a), nuageuse (b) et la plus chaude (c)

Le flux de chaleur à travers la dalle REF commence à augmenter entre 8:00 et 11:00 lorsque la différence de température $T_{SO}-T_{SI}$ augmente. La valeur maximale de ce flux est généralement enregistrée à 11:00 dans les trois périodes indiquées sur la figure III.8. Ensuite, il commence à diminuer lorsque la différence de température $T_{SO}-T_{SI}$ diminue en raison de l'augmentation de la température du plafond. Ce dernier est directement influencé par la température des parois verticales et celle de l'air intérieur de la cellule. De plus, lorsque la température du plafond dépasse celle de la surface extérieure de la dalle, le flux thermique devient négatif (généralement entre 18:00 et 21:00).

Les figures III.8a-c montrent que la toile d'ombrage réduit de manière significative le flux thermique à travers la plaque de la cellule SH par rapport à la cellule REF. Cependant, le flux thermique traversant la dalle de cellules SH est essentiellement plus élevé que celui correspondant à la dalle WP et EPS. En particulier, la réduction du flux thermique à travers les dalles de toit traitées par rapport à la cellule de référence, sur la période de neuf jours, atteignait respectivement 84%, 66% et 59% dans les cellules EPS, WP et SH. Comme il peut être prédit, ce dernier conduit à la chaleur la plus faible pendant la journée. Les techniques WP et EPS conduisent à des débits de chaleur similaires pendant la nuit, tandis que les premières présentent parfois un flux thermique plus faible en raison de l'effet de refroidissement radiatif de la toiture de nuit de la peinture blanche.

III.5. Etude comparative du comportement thermique de deux isolants naturels

Dans cette partie, nous avons réalisé une étude expérimentale dont l'objectif est de comparer le comportement thermique de deux isolants naturels répandus dans la région de Marrakech à savoir les roseaux et les fibres de palmier dattier. En effet, ces deux matériaux naturels ont été choisis pour assurer la protection thermique des toitures de deux cellules test durant la période estivale.

III.5.1. Méthodologie

La toiture de la première cellule test a été isolée thermiquement par un panneau de roseau de 6 cm d'épaisseur avec un diamètre moyen de 14 mm. Quant à la toiture de la deuxième cellule test, celle-ci a été isolée thermiquement par un panneau de fibres de palmier dattier (FPD) compactés de 4 cm d'épaisseur (Figure III.9). Les épaisseurs ont été choisies à la suite d'une étude de simulation à l'aide de TRNSYS.

Afin de pouvoir mener cette étude comparative, la toiture de la troisième cellule test est restée nue sans traitement (référence). Il est à noter que dans cette étude, la technique de la peinture blanche a été associée à ces isolants.

Pour évaluer le comportement thermique de ces deux isolants (associé à la peinture blanche WP), nous avons mesuré les températures de plafond, de l'air intérieur dans les cellules test et de la surface extérieure de la dalle. Le flux thermique traversant la dalle n'a pas été mesuré. En effet, les mêmes systèmes de mesure utilisés auparavant ont servi à la mesure des facteurs précités.



Figure III.9. Panneau de roseau de 6 cm d'épaisseur (à gauche) et panneau de FPD compactés de 4 cm d'épaisseur (à droite)

III.5.2. Résultats de l'étude

Dans cette étude, nous présentons uniquement les températures de plafond et de l'air intérieur dans les cellules test pendant une campagne de mesure de 12 jours en été 2017.

La figure III.10 présente la variation des températures de l'air intérieur dans les trois cellules test étudiées et de l'air extérieur. Le rayonnement solaire global sur un plan horizontal a été rapporté sur cette figure. Les deux cellules test où les toits sont protégés par les isolants naturels ont un comportement thermique quasiment identique avec une différence maximale de 0,9°C. Nous remarquons également que le comportement thermique des trois cellules test est identique dans l'intervalle horaire de 20:00 à 8:00 (J+1). Cela dit, les isolants naturels utilisés n'empêchent pas la dissipation de la chaleur à travers le toit durant les nuits et les matinées.

Un déphasage moyen d'une heure est remarquable entre les températures maximales enregistrées à l'extérieur et à l'intérieur des cellules test dont le toit est protégé thermiquement.

Quant aux températures de plafond, la figure III.11 montre que les deux isolants ont pratiquement le même comportement thermique. Ceux-ci procurent une réduction de la température de plafond allant jusqu'à 14°C par rapport à la référence (toiture sans traitement).

La figure III.11 montre également que l'amplitude maximale de la température de plafond des cellules test équipés de ces isolants naturels est de 17°C tandis que celle enregistrée dans la cellule test de référence est de 28°C.

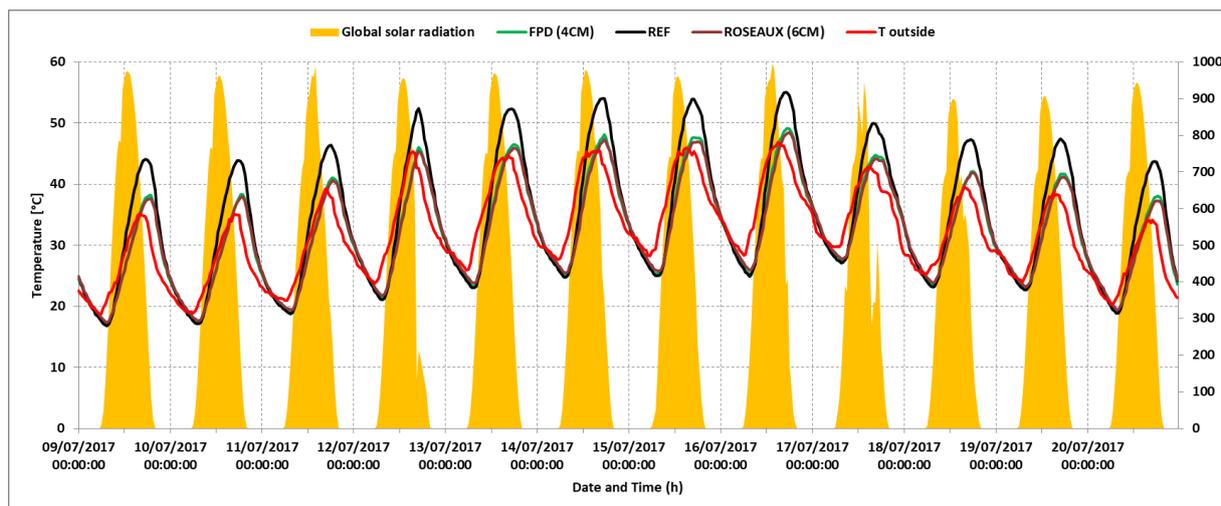


Figure III.10. Variation des températures de l'air extérieur et de l'air intérieur dans les trois cellules test étudiées et du rayonnement solaire global

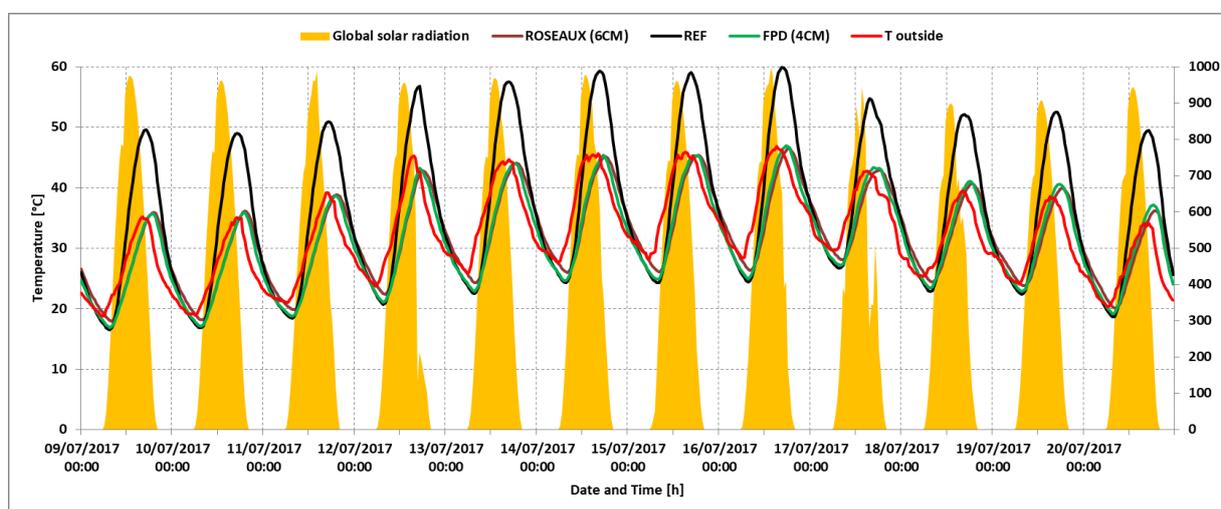


Figure III.11. Variation des températures de plafond dans les trois cellules test étudiées et de l'air extérieur et du rayonnement solaire global

Nous pouvons conclure de cette étude que les deux isolants procurent les mêmes réductions par rapport à la référence. En effet, ceux-ci ont pratiquement le même comportement thermique durant toute la campagne de mesure. Cependant, les fibres de palmier dattier est la technique la plus intéressante puisqu'elles sont abondantes (déchets) dans la région de Marrakech alors que le panneau de roseaux reste assez couteux (environ 180 DH/m² pour une épaisseur de 6cm). Ces deux matériaux ne nécessitent aucun traitement chimique pour la fabrication des isolants.

III.6. Conclusion

Dans cette étude, les performances thermiques de trois techniques passives de protection thermique et solaire des toitures sont évaluées. Ces techniques de rafraîchissement passif, qui sont l'isolation thermique (EPS), l'ombrage (SH) et la peinture blanche (WP), ont été appliquées à la dalle de béton constituant les toits de trois cellules test. L'impact de ces

techniques sur les températures de l'air intérieur des cellules, de la surface externe du toit et du plafond, ainsi que le flux de chaleur à travers la dalle de toiture, ont été évalués expérimentalement dans le climat chaud de Marrakech (Maroc). À cette fin, un suivi de mesures sur des cellules test a été effectué en été 2016 et les résultats ont été comparés à ceux d'une quatrième cellule test à toit nu (la cellule de référence). Les résultats montrent que les techniques de rafraîchissement passif étudiées ont un impact positif significatif sur le flux de chaleur à travers le toit ainsi que sur la température du plafond et de l'air intérieur des cellules test. Le toit peint en blanc a les performances thermiques les plus élevées en termes de température du plafond et de l'air intérieur. En effet, la température du plafond a été abaissée, par rapport à la cellule de référence, de 13°C, 9,9°C et 8,9°C respectivement dans les cellules avec les techniques de la peinture blanche (WP), l'isolation thermique (EPS) et l'ombrage (SH). De plus, la technique WP abaisse la température du plafond tout au long de la journée. Comme la température de la surface du plafond de la cellule est un paramètre important qui influe sur le confort thermique intérieur, la technique WP qui permet une réduction importante de cette température toute la journée améliorera ce confort thermique. En outre, la technique WP offre la plus grande réduction de la température de l'air intérieur de la cellule. Cette réduction a atteint 7,7°C; alors qu'elle était toujours inférieure à 6,9°C et 4,8°C pour les techniques EPS et SH, respectivement. En outre, la moyenne de cette réduction est respectivement de 6,5°C, 5,5°C et 3,7°C pour les techniques WP, EPS et SH. Enfin, grâce à ses excellentes propriétés de refroidissement radiatif, la technique WP a permis d'éviter la surchauffe nocturne enregistrée dans les cellules EPS et SH. Cependant, les bonnes performances de la dalle de toit peinte en blanc diminuent avec le temps en raison de l'accumulation de poussière. En conséquence, la technique WP conduit à un comportement similaire à celui de SH si elle n'est pas nettoyée ou renouvelée. D'autre part, le flux thermique à travers les dalles de toiture a été réduit, par rapport à la cellule de référence, de 84%, 66% et 59% respectivement dans les cellules dont le toit est isolé thermiquement, peint en blanc et ombragé.

Une étude comparative de deux panneaux d'isolation a permis de conclure qu'un panneau de 4 cm de fibres de palmier dattier a même les performances thermiques qu'un panneau de roseaux de 6 cm. Ces deux isolants ont procuré une réduction de la température de plafond allant jusqu'à 14°C par rapport à la référence (toiture sans traitement). Il est à noter que cette isolation thermique est associée à la technique de WP.

Nous pouvons conclure que la technique de peinture blanche est la technique de protection solaire la plus efficace pour le toit à condition que la peinture soit nettoyée et renouvelée de temps en temps (les régions soumises à un empoussièrément véhiculé par le vent, rencontrent certainement une atténuation de la réflexion solaire). Cependant, comme l'isolation thermique du toit est nécessaire pendant les mois froids dans le climat chaud et semi-aride de Marrakech [Sobhy et al, 2017], il est suggéré d'associer les techniques de la peinture blanche et d'isolation thermique ou d'ombrage et d'isolation thermique (ombrage mobile). Enfin, il est clair que toute protection solaire et thermique doit être combinée avec une technique de dissipation, telle que la ventilation naturelle, afin de fixer des températures confortables à l'intérieur des cellules test. De plus, les performances thermiques du toit peint en blanc

devraient être évaluées tout au long de l'année, surtout en hiver. D'autre part, l'évaluation de la performance thermique de ces techniques dans des cellules test à échelle réduite s'avère insuffisante et nécessite une étude approfondie dans un bâtiment réel et sur une année complète afin d'identifier le potentiel d'économie d'énergie de chacune de ces techniques. Le prochain chapitre de cette thèse présente une évaluation des performances thermique et énergétique des trois techniques passives de protection de toitures, étudiées dans ce chapitre, dans un bâtiment réel et pendant une année complète. Ce bâtiment représente une salle de classe dont les murs sont construits en pisé stabilisé.

CHAPITRE IV.

ÉVALUATION PAR LA SIMULATION SUR UN BÂTIMENT EN MATERIAUX BIOSOURCÉS

IV.1. Introduction

Dans les zones rurales marocaines, la construction des bâtiments est caractérisée par l'utilisation des matériaux locaux et biosourcés. Cependant, la généralisation de l'enseignement a poussé le gouvernement marocain de construire davantage de salles de classe dans le milieu rural durant ces dernières années. De nos jours, la majorité de ces salles de classe sont construites en préfabriqué du fait de sa rapidité dans la mise en œuvre, ou en matériaux conventionnels (béton), ces derniers étant très coûteux en production et en transport restent néanmoins des matériaux à forte émission de GES (gaz à effet de serre). Notons que ces modes de construction produisent au final, des classes inconfortables en été comme en hiver et donc pour le moins inadaptées. L'idée ici est de construire un prototype de salle de classe en matériaux locaux et énergétiquement autonome, répondant aussi bien aux normes en vigueur pour ce type de bâtiment qu'à des règles d'efficacité énergétique.

Le présent chapitre illustre les résultats de l'étude expérimentale et numérique qui consistent à évaluer les performances thermique et énergétique à la fois des matériaux locaux utilisés dans la construction et des techniques passives de chauffage/rafraîchissement appliquées au toit du bâtiment en question. À cette fin, nous avons étudié le comportement thermique de chacune des solutions proposées et leur potentiel à alléger la facture énergétique de ce type de bâtiment notamment dans les régions rurales là où l'accès à l'électricité est difficile. En effet, les procédures de l'étude expérimentale et de la modélisation numérique sont présentées dans le chapitre 2 (sections 1.2 et 2.3).

IV.2. Validation du modèle numérique

La figure IV.1 montre la variation des températures simulées et mesurées à l'intérieur du bâtiment étudié pendant la période du monitoring estival qui a duré du 20 Mai au 25 Mai 2017. La température de l'air extérieur et le rayonnement solaire sont également indiqués sur la figure. Il est à noter que la simulation du bâtiment a été effectuée en fonction des conditions du monitoring (bâtiment inoccupé et fenêtres et volets fermés). La simulation TRNSYS a été réalisée pendant deux années consécutives en utilisant des données météorologiques locales. La figure IV.1 montre que le rayonnement solaire global atteint un maximum de 1001 W/m^2 le 20 Mai à 15:00 et un minimum de 437 W/m^2 le 25 Mai à 16:00. Quant à la température extérieure, elle atteint un maximum de $42,3^\circ\text{C}$ le 20 Mai à 14:00 et un minimum de $27,7^\circ\text{C}$ le 24 Mai à 18:00, alors que la température de l'air à l'intérieur du bâtiment étudié varie entre $23,9$ et $27,1^\circ\text{C}$ avec une moyenne de $25,3^\circ\text{C}$. L'humidité de l'air intérieur enregistrée, non représentée sur la figure IV.1, varie entre 52% et 75%. Nous notons que l'enveloppe du bâtiment permet de réduire la température de l'air intérieur d'environ $15,3^\circ\text{C}$ par rapport à la température maximale de l'air extérieur. On peut également observer que les températures de l'air intérieur enregistrées n'ont pas dépassé 28°C avec une humidité de 60,5%. Ces températures sont considérées correctes dans le climat sec de Marrakech.

Les valeurs calculées de la température de l'air ont été comparées à celles mesurées in-situ. Nous notons que la température de l'air intérieur calculée varie entre $24,3$ et $27,9^\circ\text{C}$ avec une moyenne de 26°C . Le modèle numérique sous-estime parfois le déphasage horaire d'environ 1

heure entre le pic de la température extérieure et le pic de la température intérieure simulée par rapport aux résultats expérimentaux (jour du 24 Mai 2017). De plus, le modèle numérique surestime la température de l'air intérieur par rapport à celle mesurée tout au long de la période du monitoring. Nous notons que les températures de l'air simulées sont proches de celles mesurées in situ avec une différence maximale de 1,1°C enregistrée le 23 Mai à minuit et une différence minimale de 0,15°C enregistrée le 22 Mai à 9:00.

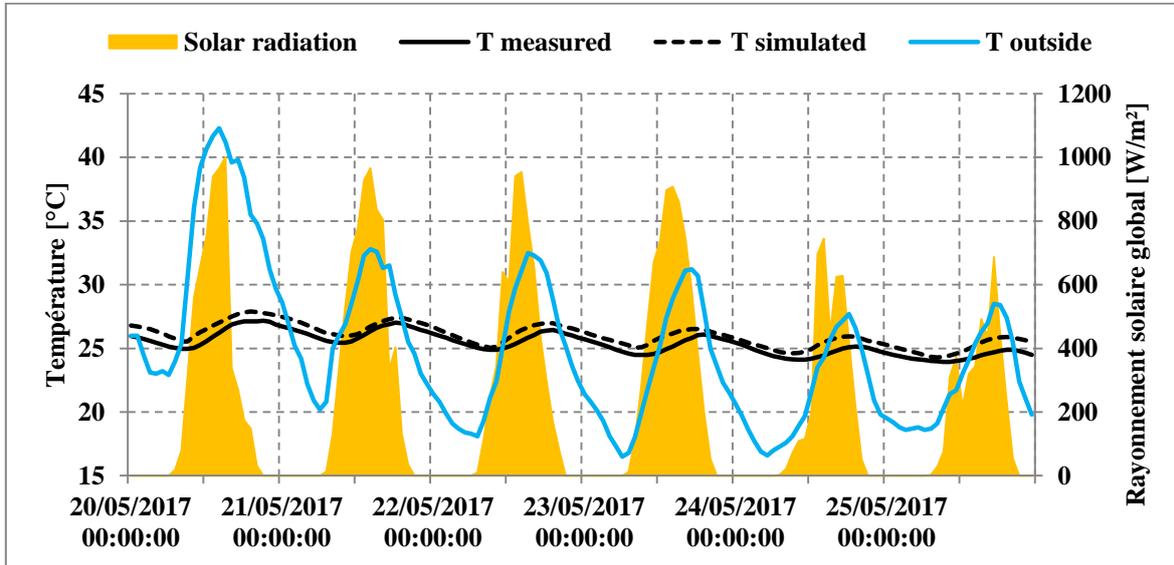


Figure IV.1. Variation des températures de l'air intérieure simulées et mesurées, de la température de l'air extérieure et du rayonnement solaire pendant une semaine d'été

Le tableau IV.1 présente le pourcentage des différences des températures de l'air intérieur simulées et mesurées. On peut voir que plus de 90% des différences de température sont inférieures à 1°C, alors que la sensibilité du capteur de température est de 0,5°C.

Écarts de température	Pourcentage des écarts
0 - 0,5°C	30%
0,5 - 1°C	62%
> 1°C	8%

Tableau IV.1. Pourcentage des différences des températures de l'air intérieure simulées et mesurées pendant une semaine d'été

En ce qui concerne la période d'hiver, nous avons effectué les mêmes mesures dans le bâtiment étudié. La figure IV.2 présente les valeurs mesurées et simulées de la température de l'air intérieur ainsi que la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire global enregistrés durant le monitoring. Selon la figure IV.2, le rayonnement solaire global atteint un maximum de 653 W/m^2 le 4 Février à 14:00 et un minimum de 253 W/m^2 le 3 Février à 15:00. Quant à la température de l'air extérieur, elle atteint un maximum de $18,5^\circ\text{C}$ le 31 Janvier à 15:00 et un minimum de $13,2^\circ\text{C}$ le 2 Février à 15:00, alors que la température mesurée de l'air à l'intérieur du bâtiment étudié varie entre $10,3^\circ\text{C}$ et $12,8^\circ\text{C}$ avec une moyenne de $11,7^\circ\text{C}$. L'humidité de l'air intérieur mesurée, non représentée sur la figure IV.2, varie entre 65% et 76%. Nous notons que les températures de l'air intérieur enregistrées n'atteignent pas la température de confort qui est de 20°C selon la norme internationale ISO 7730 adoptée par le Maroc [NM ISO 7730, 2010]. Cependant, la température de l'air intérieur du bâtiment enregistrée le 4 Février à 7:00 est de $10,9^\circ\text{C}$ alors que celle de l'air extérieur tombe à $0,8^\circ\text{C}$ à la même heure. Ce qui précède montre que l'enveloppe du bâtiment permet de maintenir la température stable par rapport à la température de l'air extérieur.

Il est important de préciser que tous les vitrages des fenêtres étaient protégés par des volets fermés durant toute la période de mesures. Les valeurs calculées de la température de l'air ont été comparées à celles mesurées in-situ. Nous notons que la température de l'air intérieur calculée varie entre $11,2$ et $12,9^\circ\text{C}$ avec une moyenne de $12,1^\circ\text{C}$. Comme en période estivale, notre modèle numérique sous-estime parfois le déphasage horaire d'environ 2 heures entre le pic de la température extérieure et le pic de la température intérieure simulée par rapport aux résultats expérimentaux. De plus, le modèle numérique surestime la température de l'air intérieur par rapport à celle mesurée. Nous notons que les températures de l'air simulées sont proches de celles mesurées in situ avec une différence maximale de $1,3^\circ\text{C}$ enregistrée le 4 Février à 10:00.

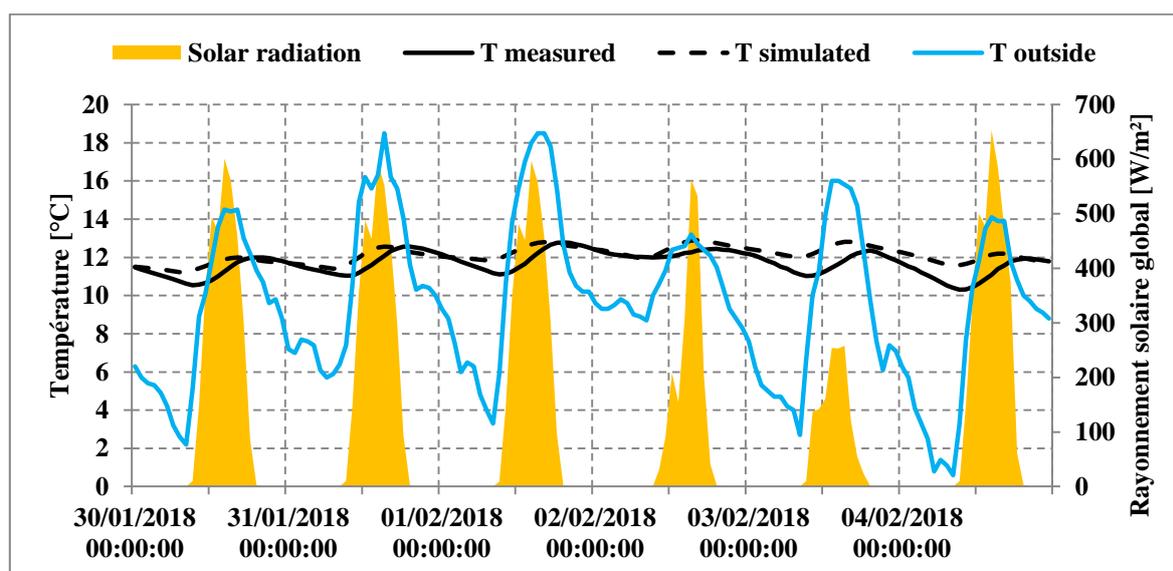


Figure IV.2. Variation des températures de l'air intérieur simulées et mesurées, de la température de l'air extérieur et du rayonnement solaire pendant une semaine d'hiver

Le tableau IV.2 présente le pourcentage des différences des températures de l'air intérieur simulées et mesurées. Nous constatons qu'environ 90% des différences de température sont inférieures à 1°C, en sachant que la sensibilité du capteur de température est de 0,5°C.

Écarts de température	Pourcentage des écarts
0 - 0,5°C	60%
0,5 - 1°C	29%
> 1°C	11%

Tableau IV.2. Pourcentage des différences des températures de l'air intérieur simulées et mesurées pendant une semaine d'hiver

IV.3. Evaluation du comportement thermique des murs en pisé

Dans cette section, le comportement thermique du bâtiment étudié, appelé RE.CASE, est évalué par comparaison avec un bâtiment hypothétique, appelé CONV.CASE, dont les murs sont en matériaux conventionnels (parpaing creux d'une largeur de 20cm + mortier de 1cm des deux côtés) et non en pisé. Les simulations des deux bâtiments ont été effectuées dans les mêmes conditions que dans la section 2 (bâtiments inoccupés et fermés). Cependant, les données météorologiques ici sont celles de l'année météorologique typique de Marrakech. Le comportement thermique est évalué par la température opérative qui combine la température de l'air intérieur et la température radiante moyenne (équation II.28). Les figures IV.3 montrent la variation de la température opérative dans les deux bâtiments RE.CASE et CONV.CASE ainsi que la température de l'air extérieur pendant une année complète. Ces figures montrent clairement que la température opérative dans le bâtiment dont les murs sont en pisé (RE.CASE) est stable avec une faible amplitude tout au long de l'année, alors que l'amplitude de la température opérative du CONV.CASE est plus élevée. En effet, la température opérative dans le bâtiment RE.CASE varie entre 11,5°C et 28,8°C pendant toute l'année, alors que cette température varie entre 10°C et 31,3°C dans le bâtiment CONV.CASE. La température de l'air extérieur chute à 2,5°C en janvier et atteint 43,2°C en juillet.

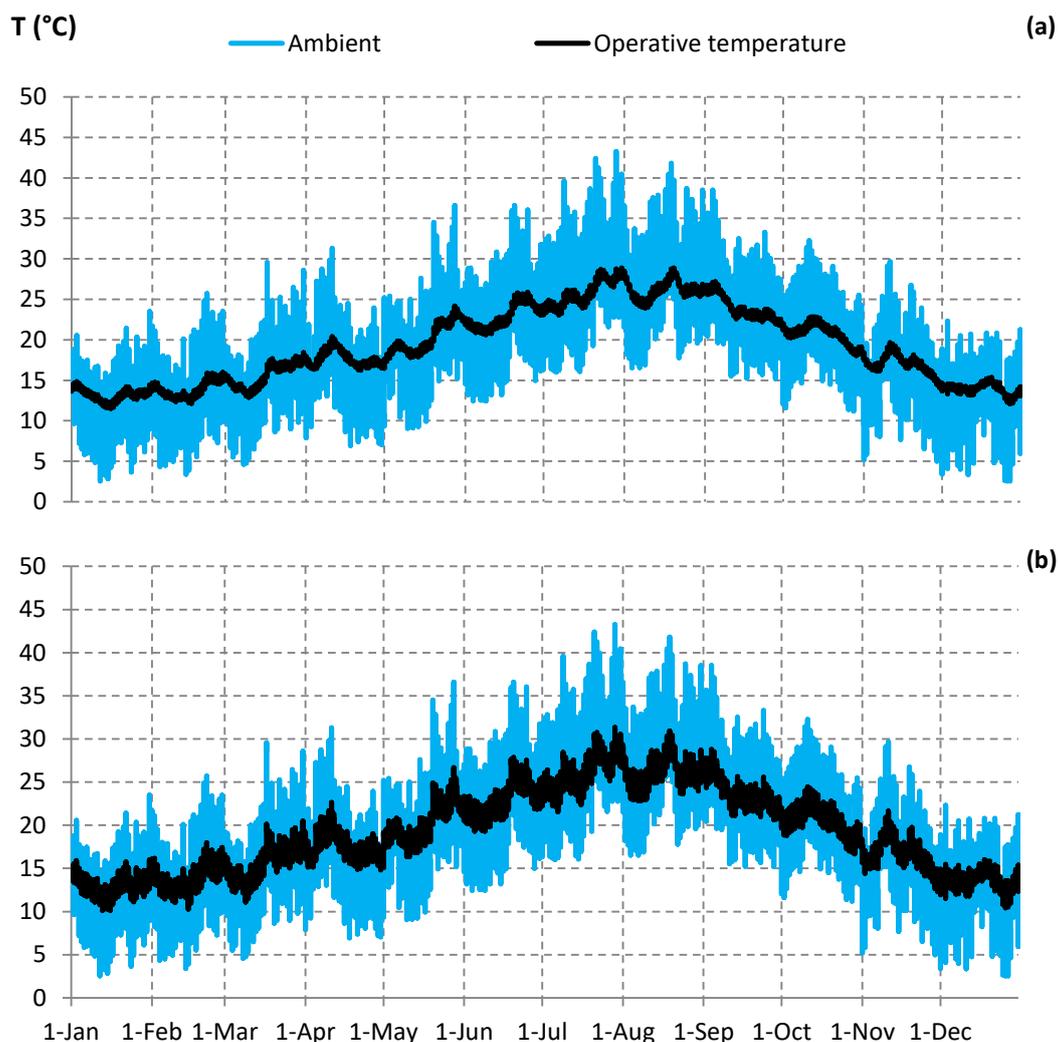


Figure IV.3. Variation de la température opérative simulée et de la température de l'air extérieure pour (a) RE.CASE et (b) CONV.CASE pendant une année complète

Afin d'effectuer une analyse plus approfondie des profils de température opérative dans les deux cas, nous avons défini une période froide représentée par trois mois d'hiver et une période chaude représentée par trois mois d'été. La période 'froide' est celle qui correspond aux mois de Décembre, Janvier et Février, durant lesquels la température de l'air ambiant atteint au minimum 2,5°C et ne dépasse pas 25,7°C. La période 'chaude' correspond aux mois de Juin, Juillet et Août, cette température atteint 43,2°C avec une moyenne de 26,5°C.

Les figures IV.4 montrent la variation de la température opérative dans le bâtiment RE.CASE (figure IV.4a) et dans le bâtiment CONV.CASE (figure IV.4b), ainsi que la variation de la température de l'air extérieur dans la période froide. Les résultats des simulations montrent que la température opérative dans le bâtiment en pisé (RE.CASE) oscille entre 11,5°C et 15,9°C avec une moyenne de 13,6°C, alors qu'elle varie entre 10°C et 17,9°C avec une moyenne de 13,5°C dans le bâtiment en parpaing creux (CONV.CASE). De plus, l'amplitude maximale (différence pic à pic en un jour) de la température opérative dans le bâtiment CONV.CASE est de 3,9°C, alors qu'elle n'est que de 1,2°C dans le bâtiment RE.CASE. Ces résultats montrent clairement que le bâtiment en pisé, en raison de son inertie thermique

élevée, stabilise sa température de l'air intérieur. En effet, la forte épaisseur des murs en pisé (53,7 cm) ne permet pas au bâtiment de profiter de la température de l'air extérieur et du rayonnement solaire du jour qui peuvent atteindre respectivement 25,7°C et 808,8 W/m² ce qui justifie la température opérative maximale atteinte, qui est de 15,9°C, pendant les trois mois d'hiver dans le RE.CASE. Contrairement aux murs en parpaing de 20 cm d'épaisseur, qui facilitent la conduction de la chaleur externe due au rayonnement solaire et à la température de l'air extérieur pendant la journée, ce qui justifie la température maximale opérative atteinte de 17,9°C en hiver dans le CONV.CASE.

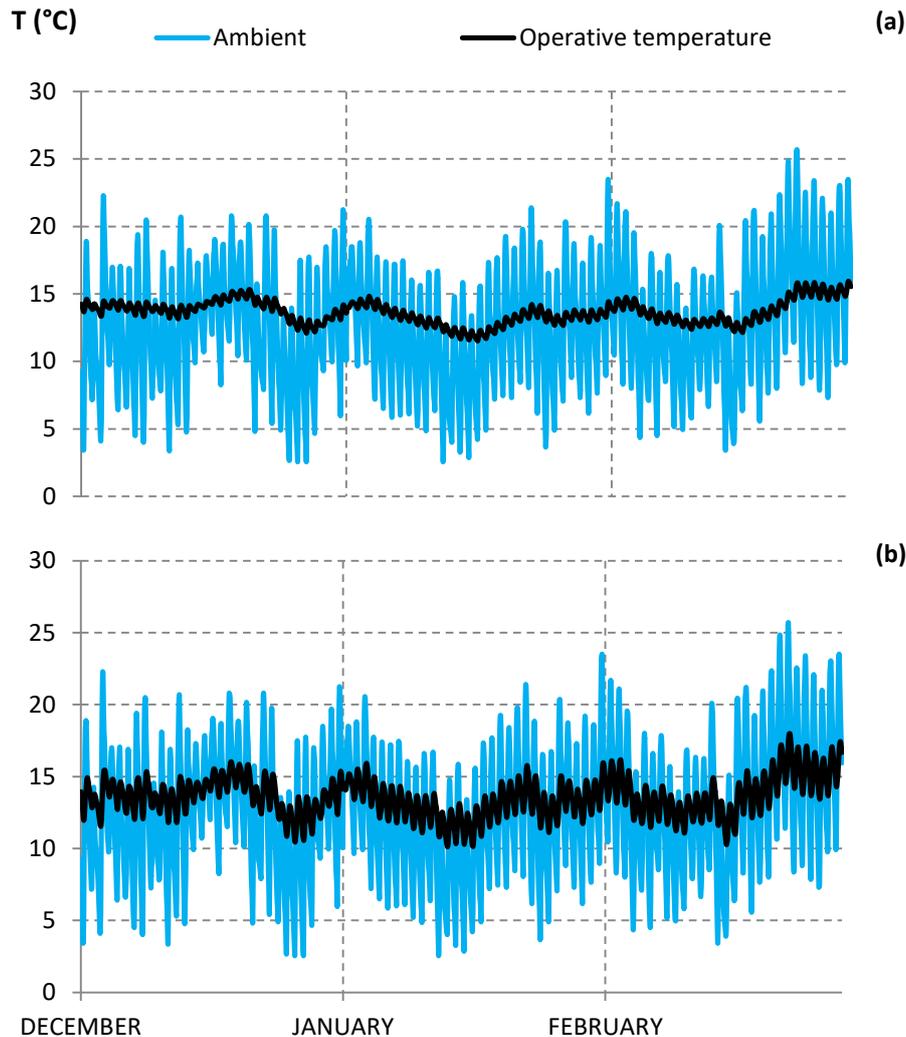


Figure IV.4. Variation de la température opérative simulée en hiver pour (a) RE.CASE et (b) CONV.CASE

Il est à noter que d'autres paramètres influencent sur le confort hivernal des deux bâtiments, en particulier la surface extérieure du toit qui est peinte en blanc. De plus, les volets extérieurs sont considérés fermés tout le temps, ce qui ne permet pas de profiter des gains solaires pendant la journée. En effet, l'ouverture de ces volets pendant les heures d'ensoleillement augmentera la température opérative des bâtiments et améliorera son confort hivernal. Dans la section suivante (section 5), les volets sont considérés ouverts pendant les périodes d'occupation.

La figure IV.5 illustre la variation de la température opérative ainsi que de la température de l'air extérieur pendant les trois mois de la saison chaude. Les résultats des simulations montrent que cette température varie entre 20,6°C et 28,8°C avec une moyenne de 25°C dans le bâtiment RE.CASE, alors qu'elle oscille entre 19,3°C et 31,3°C avec une moyenne de 25,2°C dans le bâtiment CONV.CASE. De plus, l'amplitude maximale de la température opérative dans le RE.CASE est de 1,7°C, alors qu'elle dépasse 4,6°C dans le CONV.CASE. Selon la figure IV.5, on note que lorsque la température de l'air extérieur atteint son maximum de 43,2°C, les températures opératives dans le RE.CASE et le CONV.CASE sont respectivement de 28,5°C et de 30,3°C. En ce qui concerne le déphasage entre le pic de la température de l'air extérieur et le pic des températures opératives, il est de 4 heures dans le RE.CASE et de 1 heure dans le CONV.CASE.

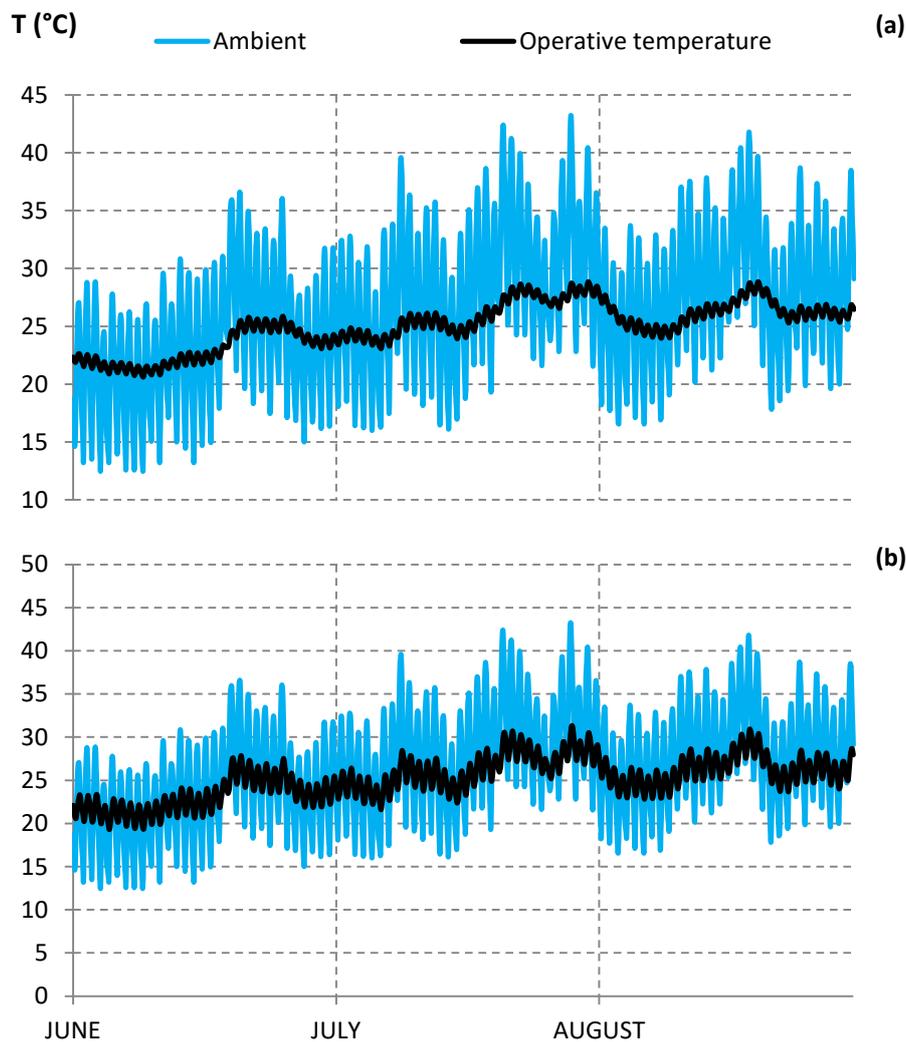


Figure IV.5. Variation de la température opérative simulée en été pour (a) RE.CASE et (b) CONV.CASE

Le comportement du matériau pisé semble être efficace en été. En effet, la température opérative, dans le bâtiment RE.CASE, varie dans l'intervalle de 20 - 28°C durant plus de 94% des heures de la saison chaude. Cet intervalle peut être considéré comme une plage des températures de confort dans les conditions climatiques de la région de Marrakech [Sobhy,

2017]. En revanche, durant la période hivernale, la performance thermique du pisé semble insuffisante. De plus, comme mentionné précédemment, l'ouverture des volets permet de profiter des gains solaires pendant la journée, ce qui peut augmenter la température opérative du bâtiment durant la période froide.

Afin d'évaluer la performance énergétique du bâtiment étudié (inoccupé et fermé), les charges de chauffage et de refroidissement sont calculées sur la base des températures de confort de 20 à 26°C définies par la norme NM ISO 7730 [NM ISO 7730, 2010]. La figure IV.6 présente les charges annuelles de chauffage et de refroidissement des deux configurations du bâtiment étudié. Le bâtiment RE.CASE présente des besoins annuels en chauffage/refroidissement d'environ 93 kWh/m²/an, tandis que les besoins annuels du bâtiment CONV.CASE s'élève à 120 kWh/m². On note que la charge de refroidissement est faible dans les deux bâtiments RE.CASE et CONV.CASE du fait de l'isolation thermique de la toiture et le revêtement blanc de sa surface extérieure. Cette charge de refroidissement est réduite pratiquement de moitié dans le RE.CASE par rapport au CONV.CASE. En outre, l'inertie thermique due aux murs en pisé réduit d'environ 21% la charge de chauffage du fait de la stabilisation de la température dans le RE.CASE par rapport au CONV.CASE.

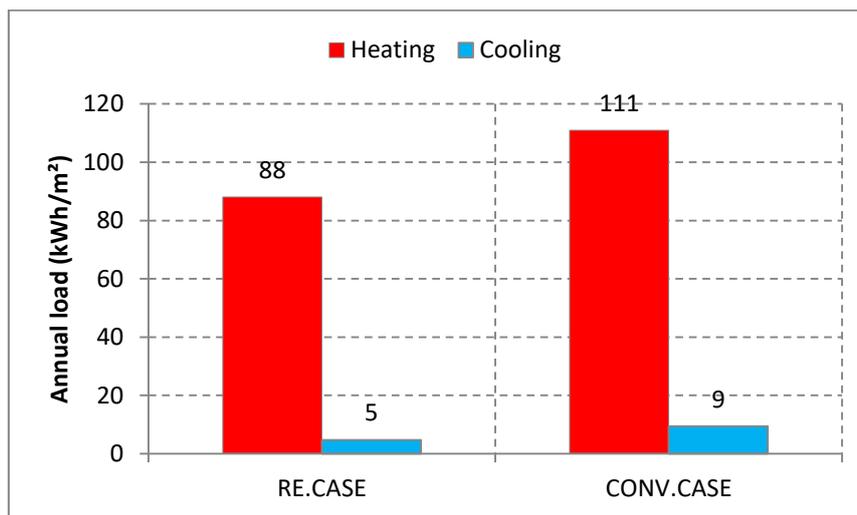


Figure IV.6. Charges annuelles de chauffage et de refroidissement dans le RE.CASE et CONV.CASE

IV.4. Etude comparative de quelques configurations de toit

Dans cette section, le bâtiment étudié RE.CASE est simulé dans des conditions réelles d'occupation. Les volets extérieurs des fenêtres sont ouverts pendant les périodes d'occupation (définies dans la section 2.3.2 du chapitre 2), mais les vitrages restent fermés. En effet, le comportement thermique et la performance énergétique des techniques passives intégrées au toit du bâtiment RE.CASE sont évalués sur une année complète dans le but de définir la ou les techniques les plus performantes dans le climat de Marrakech et de valider par la suite les résultats obtenus en cellules test à échelle réduite (chapitre 3). À cette fin, les températures du plafond (surface intérieure du toit) ont été analysées durant une période froide et une période chaude et le nombre d'heures d'inconfort thermique dans le bâtiment

(NDH) a été calculé pour chaque configuration. La charge annuelle de chauffage et de refroidissement a été également calculée pour chaque configuration sur la base des températures de confort 20 - 26°C définies par la norme NM ISO 7730 [NM ISO 7730, 2010].

IV.4.1. Description des configurations étudiées

Les configurations étudiées concernent principalement la toiture du bâtiment étudié. En effet, la première configuration (CONFIG#1) désigne le bâtiment réel occupé qui regroupe les techniques passives intégrées au toit, à savoir : l'isolation thermique en roseaux et la peinture blanche à la chaux. Ensuite chaque technique a été évaluée à la fois dans les autres configurations. En outre, l'ombrage du toit a été également évalué dans la quatrième configuration (CONFIG#4) et l'isolation thermique en roseaux a été remplacée par celle en fibres de palmier dattier dans la sixième configuration (CONFIG#6). En effet, ces fibres de constituent des déchets provenant des palmiers dattiers qui sont très répandus dans la région de Marrakech et le Sud marocain. La fabrication des panneaux de fibres de palmier dattier n'est pas coûteuse et ne nécessite aucun traitement chimique, ce qui rend le matériau écologique et durable après la durée de vie du bâtiment.

Le tableau IV.3 présente la description de chaque configuration ainsi que les paramètres utilisés dans la simulation du bâtiment sur TRNSYS.

Configurations	Description	Remarques
CONFIG#1	RE.CASE	
CONFIG#2	Identique à RE.CASE avec une dalle nue, appelée REF (référence)	Le coefficient d'absorption de la surface extérieure du toit est estimé à 0,95 (étanchéité)
CONFIG#3	Identique à RE.CASE avec une dalle nue peinte en blanc	Le coefficient d'absorption est pris égal à 0,22
CONFIG#4	Identique à RE.CASE avec une dalle nue ombragée	Le coefficient de l'ombrage est pris égal à 0,7
CONFIG#5	Identique à RE.CASE avec une dalle isolée et sans peinture blanche	La dalle est isolée de l'intérieur par une couche de roseaux de 8 cm d'épaisseur.
CONFIG#6	Identique à RE.CASE avec une isolation intérieure en fibres de palmier dattier au lieu des roseaux	Panneau de 6 cm d'épaisseur $\lambda = 0,033 \pm 0,002 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ $C_p = 1937,4 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ $\rho = 121 \pm 3 \text{ kg.m}^{-3}$ [Boumhaout et al, 2017]

Tableau IV.3. Configurations de toit étudiées

IV.4.2. Analyse des températures de plafond

Pour évaluer le comportement thermique et la performance énergétique de chaque configuration, nous nous sommes intéressés aux températures de plafond, le nombre d'heures d'inconfort et les charges de chauffage et de refroidissement. Les charges de chauffage et de refroidissement et le nombre d'heures d'inconfort thermique dans le bâtiment sont calculés sur la base de l'intervalle de température de confort 20 - 26°C défini par la norme NM ISO 7730 [NM ISO 7730, 2010].

Les simulations sont faites sur une période de 2 ans. La première année correspond au conditionnement thermique et les résultats considérés sont ceux de la deuxième année. Les résultats sont présentés sur deux périodes, la semaine la plus 'chaude' et la semaine la plus 'froide' de l'année météorologique typique de Marrakech.

Les figures IV.7 et IV.8 montrent la variation des températures du plafond calculées pendant une semaine d'hiver et pendant une semaine d'été pour les configurations étudiées. Les jours 2, 3, 9 et 10 novembre, et le 15 et le 16 juin sont des jours de « weekend » où il n'y a pas d'occupation dans le bâtiment étudié. D'après ces résultats, nous constatons que les configurations avec isolation (#1, #5 et #6) sont plus efficaces en hiver car elles permettent de stabiliser la température du plafond (effet de l'inertie thermique). En revanche, en été, la couche d'isolation thermique ne fait que retarder la dissipation de la chaleur intérieure dans le bâtiment. La température du plafond dans ces configurations est généralement supérieure à celle de la référence (#2) en hiver, sauf pendant les jours des 8, 9 et 10 novembre.

Selon la figure IV.7, les températures calculées du plafond dans les configurations (#1, #5 et #6) sont situées dans la plage de températures 17-21°C, alors qu'elles sont comprises entre 9 et 21°C dans les configurations où le toit n'est pas isolé thermiquement (#2, #3 et #4). La température de l'air extérieur est comprise entre 5 et 27°C. D'après la même figure, on constate que la température du plafond dépend parfaitement de la température de l'air

extérieur et le rayonnement solaire notamment dans les configurations (#2, #3 et #4). Ceci dit que l'isolation thermique joue parfois un rôle négatif dans le confort thermique hivernal et empêche le flux de chaleur de pénétrer à l'intérieur durant la journée pour chauffer le bâtiment. En effet, durant les jours du 8, 9 et 10 novembre, on remarque que les températures de plafond dans les configurations sans isolation thermique de toit augmentent dans les après-midi avec l'augmentation de la température de l'air extérieur contrairement aux configurations avec une isolation thermique du toit où la température du plafond reste stable.

La figure IV.7 montre clairement que la configuration #5 est celle qui procure une température la plus élevée durant cette semaine d'hiver, suivie par la configuration #6 ensuite la configuration #1 qui représente le bâtiment réel (RE.CASE). Cela se justifie par l'absence de la peinture blanche dans la configuration #5. Cependant, ces trois configurations de toit ont quasiment le même comportement thermique avec une amplitude très faible ($\sim 0,6^{\circ}\text{C}$) par rapport à la température de l'air extérieur. En outre, lorsque cette dernière augmente pendant les jours du 5 au 10 novembre, la température du plafond n'augmente pas dans les configurations #1, #5 et #6 et reste quasiment stable contrairement à ce qu'on observe sur les configurations #2, #3 et #4 et notamment celle de référence (#2) qui suit la température de l'air extérieur. Quant aux configurations #3 et #4, la figure IV.7 montre que l'effet de la peinture blanche ou de l'ombrage est indésirable notamment dans la période où les températures extérieurs sont basses. Ces deux techniques ne sont pas très performantes en hiver puisqu'elles diminuent l'absorption du rayonnement solaire.

Il est à noter que pendant les jours d'inoccupation, la température du plafond reste pratiquement stable toute la journée. En outre, le déphasage entre la température de l'air extérieur et celle du plafond est d'environ 4 heures dans toutes les configurations et ceci est dû la grande inertie thermique des murs en pisé.

Ce qui précède montre clairement que la présence de l'isolation thermique est très bénéfique lorsque les températures à l'extérieur sont très basses. Et lorsqu'elles augmentent, l'effet de l'isolation thermique reste bénéfique puisqu'elle garde la température du plafond stable, ce qui influence directement sur l'environnement intérieur du bâtiment.

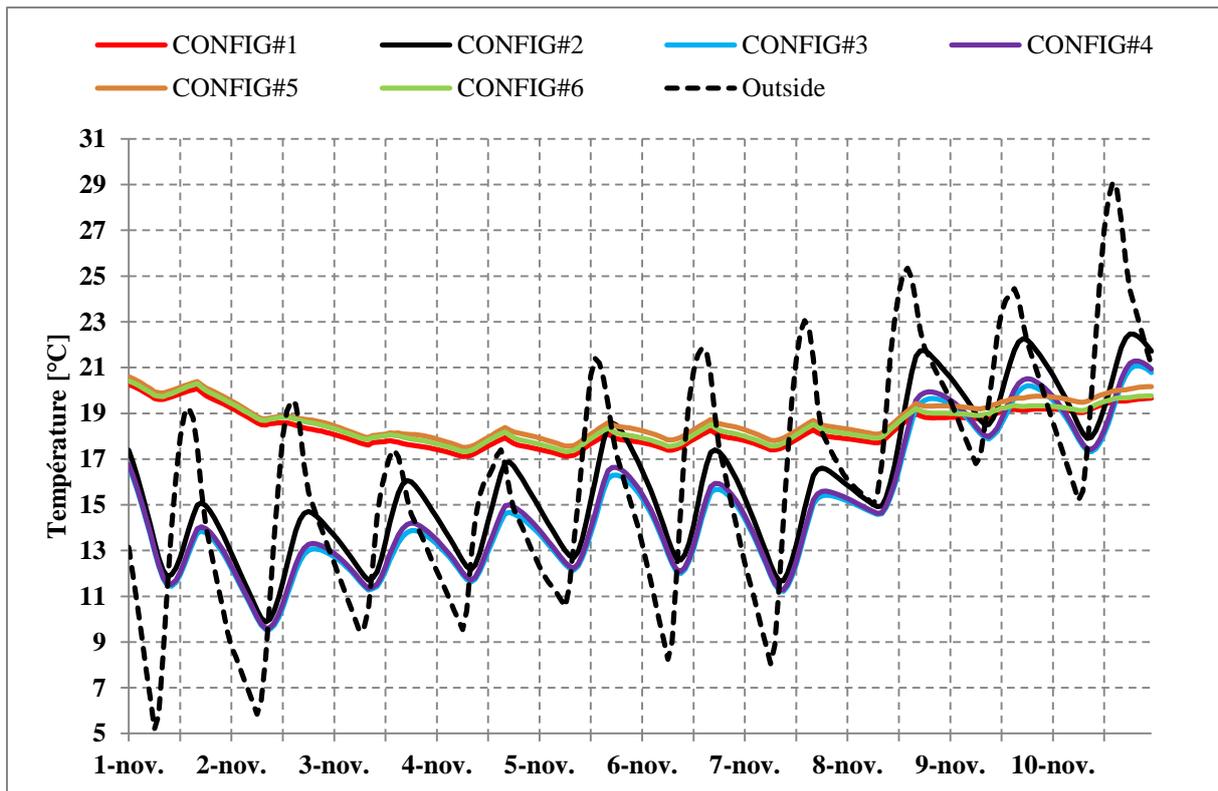


Figure IV.7. Variation de la température de l'air extérieur et de la température du plafond pendant une semaine d'hiver pour les configurations étudiées

Pour mieux analyser l'effet de chaque configuration, nous avons comparé chaque configuration à la configuration de référence (#2) où le toit est nu. Le tableau IV.4 présente la différence maximale entre les configurations étudiées et la configuration de référence. En effet, les configurations #5 et #6 semblent être les plus efficaces en hiver puisqu'elles permettent d'augmenter la température de plafond d'environ 8,8°C par rapport à une dalle nue sans traitement. La configuration #1 (bâtiment réel) est également intéressante puisqu'elle permet d'augmenter la température du plafond par rapport à la référence. En comparant les configurations #1 et #5, on constate que la présence de la peinture blanche sur le toit dans la configuration #1 n'influence pas trop sur la température du plafond (~0,2°C). Ceci dit, que seule l'isolation thermique du toit qui fait la différence entre les configurations étudiées. En outre, dans la configuration #6, on observe l'importance de l'isolation en fibres de palmier dattier au lieu des roseaux. Cette technique performe bien en hiver même si elle est associée à la peinture blanche qui diminue l'absorption solaire du toit.

ΔT	#1 - REF	#3 - REF	#4 - REF	#5 - REF	#6 - REF
Max	+8,6	-0,3 (+0)	-0,2 (+0)	+8,8	+8,8

Table IV.4. Augmentation maximale de la température du plafond par rapport à la configuration de référence (#2) pendant la semaine d'hiver

Concernant la période estivale, la figure IV.8 montre clairement que les configurations de toit avec isolation thermique ont une température de plafond qui varie entre 22,7°C et 29,1°C alors que celle-ci varie entre 18°C et 36,1°C dans les configurations du toit sans isolation thermique, pendant que la température de l'air extérieur varie entre 13,2°C et 36,4°C. D'après

cette figure, les configurations de toit où l'isolation thermique est associée à la peinture blanche (#1 et #6) ont la meilleure performance thermique et notamment la configuration #1 qui représente le bâtiment réel étudiée (tableau IV.5). Dans cette configuration, la température du plafond est comprise entre 22,7°C et 28,1°C. L'absence de la peinture blanche dans la configuration #5 justifie les températures de plafond élevée par rapport aux configurations #1 et #6, ce qui montre l'importance de la technique de peinture blanche durant la période estivale qui permet de diminuer l'absorptivité du toit. Quant aux configurations #3 et #4, elles sont performantes lorsque la température de l'air extérieur ne dépasse pas 30,1°C (du 12 au 18 juin). En effet, la technique de peinture blanche et la technique d'ombrage du toit permettent d'avoir une température de plafond qui ne dépasse pas 26,1°C et 27,3°C respectivement. Cependant, ces températures dépassent 30°C lorsque la température de l'air extérieur augmente dans les journées de 19 et 20 juin. En outre, la température de plafond dans la configuration de référence (#2) dépasse la température de l'air extérieur dans les journées du 12, 18 et 19 juin. Cette augmentation peut être justifiée par l'augmentation de flux de chaleur qui traverse la dalle nue et qui résulte d'un rayonnement solaire très fort.

Pendant les matinées et les nuits, les configurations de toit sans isolation thermique (#2, #3 et #4) ont permis de faciliter le refroidissement du plafond en facilitant l'évacuation de la chaleur à travers le toit. Cependant, dans les configurations #1, #5 et #6, la température du plafond reste pratiquement stable pendant la nuit et le matin comme pendant la journée.

Il est à noter que le déphasage entre la température maximale de l'air extérieur et la température maximale du plafond est d'environ 5 heures. Autrement dit, la température maximale du plafond est atteinte deux heures avant la fin de l'occupation du bâtiment, ce qui permet de réduire les heures de l'utilisation des systèmes de refroidissement.

Ce qui précède montre que l'isolation thermique du toit est indispensable dans le climat de Marrakech. En outre, l'ajout de la peinture blanche permet d'augmenter la performance thermique du toit. Cette technique permet de faciliter les échanges radiatifs avec le ciel durant la nuit ce qui permet de refroidir la surface extérieure du toit et permet de réduire l'absorptivité du toit durant les jours ensoleillés. Les deux techniques (isolation thermique + peinture blanche) peuvent être associées à une technique de dissipation de chaleur comme la ventilation naturelle afin d'atteindre un bon niveau de confort et notamment pendant les périodes où la température de l'air extérieur n'est pas trop élevée. Cependant, seule la technique de peinture blanche semble ne pas être assez performante pendant les jours chauds mais elle permet de faciliter le refroidissement du plafond pendant la nuit et le matin en absence de l'isolation thermique du toit. De plus, le comportement thermique de la technique d'ombrage est pratiquement identique à celui de la peinture blanche.

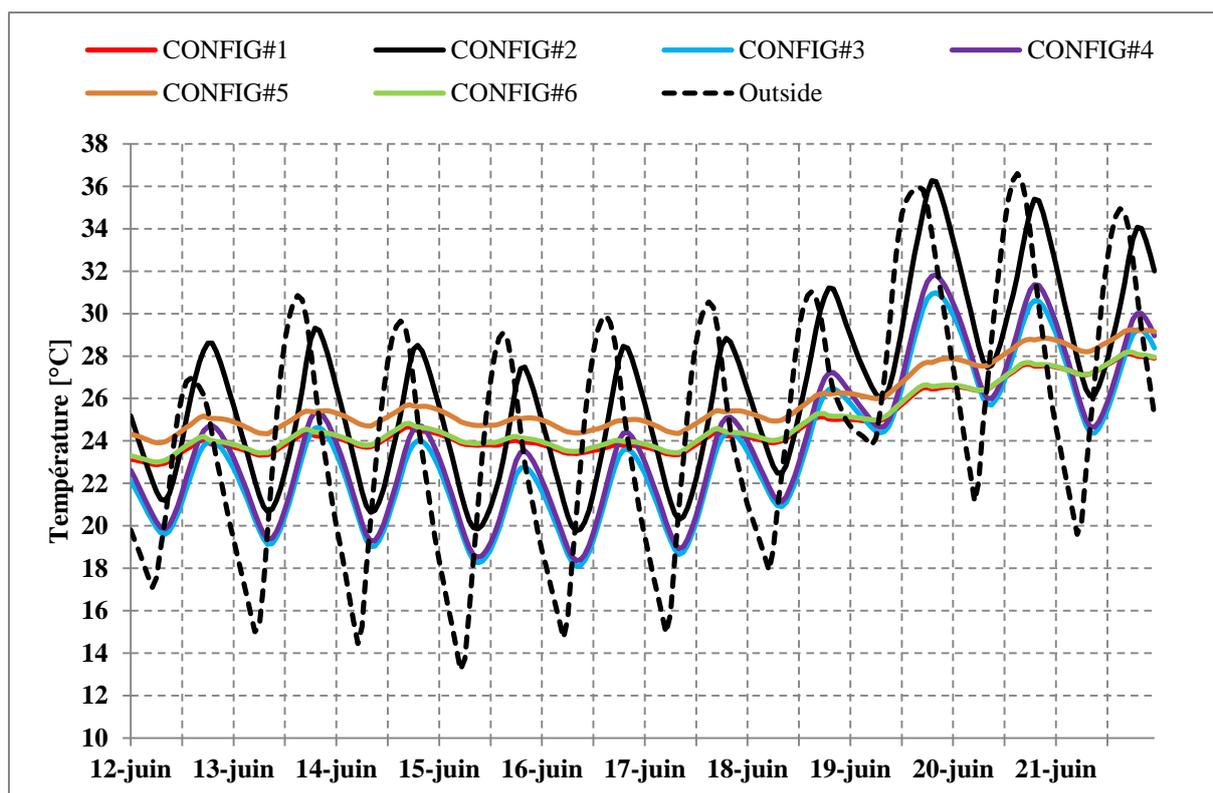


Figure IV.8. Variation de la température de l'air extérieur et de la température du plafond pendant une semaine d'été pour les configurations étudiées

Pour approfondir l'analyse du comportement thermique des configurations étudiées, nous avons déterminé la différence maximale entre chaque configuration étudiée et celle de référence (#2). Le tableau IV.5 présente ces différences maximales relativement à la configuration où le toit est nu. En effet, le tableau montre que la meilleure configuration du toit est celle du bâtiment réel (#1), suivie par la configuration #6 qui représente le même toit avec une isolation thermique en fibres de palmier dattier au lieu des roseaux. En ce qui concerne la configuration #5, on constate que seule l'isolation thermique du toit n'est pas suffisante en été et doit être associée à la peinture blanche pour augmenter sa performance thermique (conclusion du chapitre 3 sur les cellules test).

Quant à la configuration #3, on remarque que seule l'application de la peinture blanche au toit procure une réduction de température d'environ 5,4°C par rapport à la référence (#2). Mais cette couche de peinture doit être renouvelée ou nettoyée pour garder la même performance durant toute la période d'été (hypothèse de simulation). De plus, l'ombrage du toit à 70% a également un effet bénéfique et permet de diminuer la température du toit d'environ 4,5°C par rapport à la référence. On note que la mise en œuvre de ces deux techniques ne demande pas un grand investissement, et que celles-ci peuvent être retirées pendant la période hivernale.

ΔT	#1 - REF	#3 - REF	#4 - REF	#5 - REF	#6 - REF
Max	-9,8	-5,4	-4,5	-8,6	-9,7

Table IV.5. Réduction maximale de la température du plafond par rapport à la configuration de référence (#2) pendant la semaine d'été.

IV.4.3. Analyse des heures d'inconfort et des consommations énergétiques

Afin d'analyser le niveau de confort de chaque configuration de toit étudiée, nous avons calculé les heures d'inconfort sur la base de la température opérative dans le bâtiment étudiée pour la plage de température 20 - 26°C définie par la norme internationale NM ISO 7730 [NM ISO 7730, 2010]. La figure IV.9 présente le nombre d'heures d'inconfort thermique en hiver et en été. On remarque que la configuration #3 est la configuration qui représente un nombre d'heures d'inconfort thermique en hiver très important qui atteint 1226 heures (où la température opérative est inférieure à 20°C) et celle qui représente le nombre le plus bas d'heures d'inconfort thermique en été (~368 heures). De plus, la configuration #5 représente la configuration avec un nombre d'heures d'inconfort thermique élevé en été (~561 heures) et un nombre d'heures d'inconfort thermique en hiver le plus (~953 heures). La configuration de référence (#2) est celle qui représente un grand nombre d'heures d'inconfort avec un total de 1618 heures sur une année complète, suivie par la configuration #4 avec un total de 1598 heures en une année.

On constate également sur la figure IV.9 que les configurations #1 et #6 sont pratiquement identiques en termes d'heures d'inconfort thermique avec un total de 1497 heures pour la configuration #6 et un total d'heures de 1501 pour la configuration #1. Cette dernière performe légèrement mieux que la configuration #6 en été avec un total de 4 heures en moins.

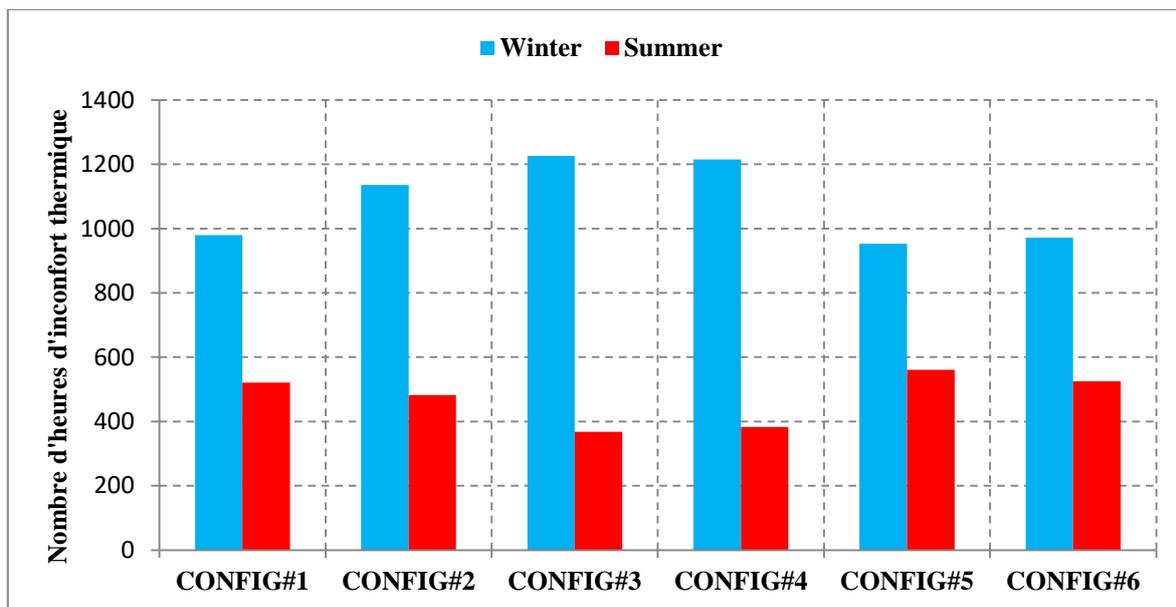


Figure IV.9. Le nombre d'heures d'inconfort thermique en hiver et en été

Pour atteindre l'intervalle des températures de confort thermique 20-26°C définie par la norme internationale NM ISO 7730 [NM ISO 7730, 2010], des systèmes de conditionnement d'air doivent être mis en place. Ces systèmes fonctionnent lorsque la température de l'air intérieur est inférieure à 20°C (chauffage) et lorsque la température de l'air intérieur est supérieure à 26°C (refroidissement). En effet, nous avons calculé les charges annuelles pour chaque configuration du toit étudiée. La figure IV.10 présente la charge de chauffage et la charge de refroidissement pour chaque configuration. On remarque que les configurations #1 et #6, où la technique d'isolation thermique est associée à la technique de peinture blanche,

sont identiques en termes de consommations énergétiques du bâtiment. Elles procurent une réduction annuelle totale d'environ 9 kWh/m² alors que la technique d'isolation thermique du toit dans la configuration #5 permet de réduire la consommation annuelle de 8 kWh/m². En outre, seule la technique de peinture blanche dans la configuration #3 permet de réduire les consommations énergétiques annuelles de 1 kWh/m² par rapport à la référence. Quant à l'ombrage du toit dans la configuration #4, il procure une réduction de 2 kWh/m² par rapport à la configuration de référence (#2).

Selon la figure IV.10, les configurations de toit avec isolation thermique peuvent réduire les consommations en chauffage d'environ 8 kWh/m² par rapport à la configuration de référence où le toit est sans aucun traitement. De plus, l'absence de cette isolation thermique et la présence d'une protection thermique (peinture blanche ou ombrage) est la configuration qui consomme le moins en refroidissement et procure une réduction d'environ 4 kWh/m² par rapport à la référence (#2). Cette étude paramétrique a prouvé également que le remplacement de 8 cm de roseaux par 6 cm de fibres de palmier dattier n'a aucun effet sur la consommation énergétique du bâtiment. Il serait donc mieux de privilégier ce matériau dans les régions Sud du Maroc.

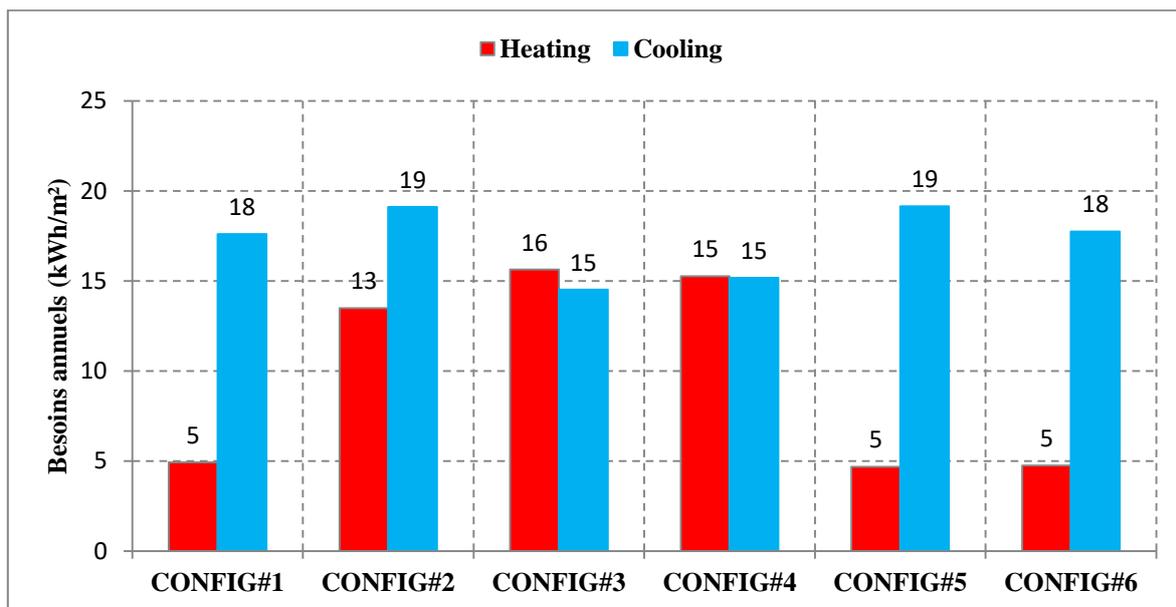


Figure IV.10. Charges annuelles de chauffage et de refroidissement pour les configurations étudiées

IV.4.4. Comparaison avec le Règlement thermique de construction Marocain

Dans cette partie, nous avons mené une comparaison entre le bâtiment étudié (avec occupation) et le RTCM. En effet, ce dernier fixe un cadre normatif pour les composantes de l'enveloppe du bâtiment selon deux approches performancielle et prescriptive. Ces niveaux sont définis pour chaque type d'usage et pour chaque zone climatique.

Il est à noter que le territoire Marocain a été subdivisé en six zones climatiques (cf Figure III.3) homogènes en se basant sur l'analyse des données climatiques enregistrées pendant 10 ans [RTCM, 2014].

IV.4.4.1. Approche prescriptive

Dans cette partie, nous avons comparé les caractéristiques thermiques des composantes de l'enveloppe du bâtiment étudié aux exigences limites réglementaires des bâtiments tertiaires situés dans la zone climatique 5 (Marrakech). Le tableau IV.6 présente les valeurs de U et de R exigées par le RTCM. Le coefficient de transmission thermique (U) est défini comme étant la quantité de chaleur traversant une paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de températures entre les ambiances situées de part et d'autre de ladite paroi. La résistance thermique (R) est définie comme la capacité d'un matériau à ralentir le transfert de chaleur par conduction.

	Taux des baies vitrées TGBV	U des toitures exposées $W.m^{-2}.K^{-1}$	U des murs extérieurs $W.m^{-2}.K^{-1}$	U des Vitrages $W.m^{-2}.K^{-1}$	R des planchers sur sol $m^2.K.W^{-1}$	Facteur Solaire FS* des vitrages
Zone climatique réglementaire Z5 (Réf. Marrakech)	$\leq 15\%$	$\leq 0,65$	$\leq 0,80$	$\leq 3,30$	$\geq 1,00$	NE (Pas d'exigences)
	16-25%	$\leq 0,65$	$\leq 0,70$	$\leq 3,30$	$\geq 1,00$	Nord NE Autres: $\leq 0,7$
	26-35%	$\leq 0,55$	$\leq 0,60$	$\leq 2,60$	$\geq 1,00$	Nord: $\leq 0,6$ Autres: $\leq 0,4$
	36-45%	$\leq 0,49$	$\leq 0,55$	$\leq 1,90$	$\geq 1,00$	Nord: $\leq 0,5$ Autres: $\leq 0,3$

Tableau IV.6. Exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments dans le secteur tertiaire pour la zone climatique 5 (Marrakech) [RTCM, 2014]

Tous les bâtiments (résidentiels et tertiaires) au Maroc sont concernés par ce règlement et doivent répondre aux exigences qui varient selon le taux global des baies vitrées (TGBV) du bâtiment et sa zone climatique [Loi 47-09, 2015]. Dans le cas du bâtiment étudié, le TGBV ne dépasse pas 15% de la surface totale des façades et il est situé dans la ville de Marrakech. Le tableau IV.7 illustre les valeurs limites exigées par le RTCM et celles calculées par TRNSYS ou mesurées in-situ.

Ce tableau comparatif montre clairement que seule la toiture qui respecte l'approche prescriptive du RTCM. Le vitrage simple utilisé dans le bâtiment étudié ne permet pas d'atteindre la valeur de U exigée par le RTCM. Ce dernier prévoit l'isolation thermique du plancher sur terre-plein avec valeur minimale de R égale à $1 m^2.K.W^{-1}$. Cependant, notons que cette isolation thermique va à l'encontre du rafraichissement passif dans les climats à prédominance de la charge de refroidissement. Cet aspect sera étudié ci-après.

	U des toitures exposées $W.m^{-2}.K^{-1}$	U des murs extérieurs $W.m^{-2}.K^{-1}$	U des Vitrages $W.m^{-2}.K^{-1}$	R des planchers sur sol $m^2.K.W^{-1}$
Cas du RTCM	$\leq 0,65$	$\leq 0,80$	$\leq 3,30$	$\geq 1,00$
Bâtiment réel	$\sim 0,52^{**}$	$\sim 1,75$ $\pm 0,09^*$	$\sim 5,70^{**}$	$\sim 0,25^{**}$

Tableau IV.7. Comparaison des caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment étudié à celles exigées par le RTCM.

*valeur mesurée in-situ et **valeurs calculées par TRNSYS

Quant aux murs verticaux en pisé sont loin d'être dans les normes. En effet, le coefficient de transmission (U) des murs extérieurs ne répond pas aux exigences du RTCM selon lesquelles la valeur de U doit être inférieure ou égale à $0,8 W.m^{-2}.K^{-1}$. Les études de Goodhew et Griffiths [Goodhew et Griffiths, 2005], Hall et Allinson [Hall et Allinson, 2008], Parra-Saldivar et Batty [Parra-Saldivar et Batty, 2006] et Mendonca [Mendonca, 2007] montrent que l'ajout d'une couche d'isolation thermique par exemple, au matériau du pisé peut satisfaire aux exigences des réglementations thermiques.

Les murs massifs en pisé ont une performance thermique très élevée et sont connus par leur capacité à stabiliser la température et l'humidité intérieures mais ce type de matériau de construction à grande inertie thermique n'est pas pris en considération dans l'approche prescriptive du RTCM. Cette approche est de ce fait inapplicable pour des bâtiments construits avec ces matériaux. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser des simulations thermiques afin de déterminer les besoins en chauffage et refroidissement de ce type de bâtiment afin de vérifier leur conformité au RTCM ; c'est l'approche performancielle.

IV.4.4.2. Approche performancielle

Les besoins spécifiques thermiques annuels maximaux de chauffage et de refroidissement dans le secteur tertiaire sont fixés par le RTCM suivant la zone climatique. Dans la zone climatique 5 (Marrakech), ces besoins annuels sont fixés à $65 kWh/m^2$ pour les bâtiments tertiaires destinés à l'usage de l'éducation [RTCM, 2014].

Les résultats qui précèdent montre clairement que les besoins de chauffage et de refroidissement sont d'environ $23 kWh/m^2$. Ces besoins ne représentent que 41% des besoins fixés par le RTCM.

Afin d'identifier l'impact de l'isolation thermique du plancher bas, nous avons simulé le bâtiment réel en intégrant une isolation thermique au plancher bas de 2 cm dont les caractéristiques thermiques sont ; $\lambda = 0,035 W.m^{-1}.K^{-1}$, $C_p = 1450 J.kg^{-1}.K^{-1}$, $\rho = 35 kg.m^{-3}$. Les résultats montrent que l'ajout de cette couche permet de diminuer la charge annuelle de chauffage de 20% tandis que la charge de refroidissement est augmentée de 6%.

Ce qui précède permet de conclure que les murs massifs en pisé ont un impact primordial dans le confort thermique du bâtiment et sa performance énergétique. En effet, la valeur U mesurée de ces murs extérieurs, est trop élevée par rapport à celle exigée par le RTCM d'une

part, bien que les besoins annuels en chauffage et en refroidissement restent inférieurs à ceux fixés par le RTCM d'autre part.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la performance thermique et énergétique d'un bâtiment prototype d'une salle de classe en milieu rural. À cette fin, une campagne de mesure des températures de l'air intérieur et extérieur a été réalisée pendant une semaine typique au mois de Mai 2017 et une semaine typique en fin du mois de Janvier 2018 et début du mois de Février 2018 dans le bâtiment en question. Les températures enregistrées à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment ont été utilisées pour calibrer et valider le modèle numérique réalisé sur TRNSYS. Ce modèle nous a servi pour étudier le comportement thermique de ce bâtiment pendant une année complète à l'aide d'un fichier météorologique TMY de la ville de Marrakech où le bâtiment est construit. Dans un premier temps, nous avons réalisé une comparaison entre le bâtiment réel et un bâtiment équivalent utilisant des murs en blocs de béton (parpaing), afin d'évaluer la performance thermique des murs en pisé stabilisé dans le climat de Marrakech. L'étude a montré que la grande inertie thermique des murs en pisé stabilisé permet de stabiliser la température opérative pendant toute l'année, ce qui engendre une réduction des besoins annuels d'environ 23% tout en économisant le coût de construction d'environ 60%. Cette étude a montré également qu'en été, la température opérative varie dans un intervalle de 20 - 28°C. En revanche, la performance thermique des murs en pisé semble être insuffisante en hiver car la température opérative ne dépasse pas 16°C.

Ensuite, nous avons évalué la performance thermique et énergétique de plusieurs configurations de toit via une étude paramétrique. Cette étude a montré que les techniques passives intégrées dans le toit du bâtiment étudié (réel) permettent de réduire les heures d'inconfort thermique de 7% par rapport à la configuration de référence. Par conséquent, les consommations énergétiques sont réduites de 28%.

De plus, nous avons également effectué une comparaison entre les caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment étudié et celles exigées par le RTCM. Celle-ci a montré que les caractéristiques thermiques des murs massifs en pisé ne respectent pas le niveau exigé par ce règlement. Toutefois, ces murs ont une performance thermique très élevée mais ce type de matériau de construction à grande inertie thermique n'est pas pris en considération dans l'approche prescriptive du RTCM. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser des simulations thermiques afin de déterminer les besoins en chauffage et refroidissement de ce type de bâtiment afin de vérifier leur conformité au RTCM.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail avait pour objectif l'étude de l'impact d'intégration de quelques techniques passives aux toitures des bâtiments situés dans la région de Marrakech, dont le climat est chaud et semi-aride. L'étude expérimentale du comportement thermique des techniques passives choisies a été menée, dans des conditions météorologiques réelles, sur quatre cellules test identiques à échelle réduite. Trois techniques passives ont été appliquées aux toits de trois cellules test, à savoir : peinture blanche, ombrage et isolation thermique tandis que le toit de la quatrième cellule test est resté nu (sans traitement). L'objectif était d'évaluer les performances thermiques des trois techniques simultanément pendant l'été en les comparant à un toit nu dit de référence. L'étude comparative réalisée dans les cellules test à échelle réduite pendant la période estivale d'été, s'est avérée insuffisante du fait que le comportement thermique des techniques passives choisies n'a pas pu être évalué pendant la période hivernale pour raison de logistique. Cependant, ayant pu évaluer l'impact des transferts de chaleur dus à la charge climatique chaude de Marrakech, sur des modèles réduits de type mono-zone (cellules test), nous avons cherché à atteindre une application à l'échelle 1 qui concernerait un bâtiment réel. À cette fin, un bâtiment de taille réelle est alors construit dans la ville de Marrakech pour évaluer à la fois le comportement thermique des trois techniques passives sur une année climatique ainsi que leur capacité à réduire les charges de chauffage et de refroidissement dans le bâtiment en question. Le logiciel TRNSYS et un fichier météorologique de la ville de Marrakech ont alors été utilisés à cet effet. Le bâtiment représente une salle de classe du milieu rural bâtie sur terre-plein et dont les murs sont massifs (53,7 cm d'épaisseur) et construits en pisé stabilisé (5% du ciment). Une étude expérimentale a été réalisée en été 2017 puis en hiver 2018. Elle a consisté en un suivi de mesures du bâtiment par le biais de capteurs de température et d'humidité relative de l'air ambiant intérieur. Une approche numérique permettant de modéliser le bâtiment est ensuite réalisée et validée en utilisant les températures mesurées in-situ. Plusieurs configurations de toit sont étudiées afin d'évaluer le comportement thermique de l'ambiance selon la technique adoptée séparément de façon individuelle, ou encore combinées entre elles. En outre, les caractéristiques thermiques du bâtiment étudié sont comparées à celles exigées par le RTCM.

En premier lieu, l'étude bibliographique nous a permis d'identifier les techniques passives et les solutions bioclimatiques utilisées à travers le monde pour améliorer la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment, et notamment celles appliquées aux toitures puisqu'elles sont les surfaces chauffées davantage par les rayons solaires verticaux. Cette étude nous a permis également de s'intéresser particulièrement aux matériaux locaux et naturels pour construire un deuxième prototype dans lequel nous avons évalué les techniques passives choisies.

Ensuite, nous avons évalué le comportement thermique de quatre cellules test identiques simultanément pendant une période estivale. Les toits de trois cellules test sont équipés des techniques passives choisies lors de l'étude bibliographique et le toit de la quatrième cellule test est resté nu et sans aucun traitement. Le suivi expérimental a montré que les techniques

passives à savoir la peinture blanche, l'ombrage et l'isolation thermique ont tous un effet bénéfique et ont permis de réduire les échanges thermiques avec l'extérieur par rapport à un toit nu. En effet, la température du plafond a été abaissée, par rapport à la cellule de référence, de 13°C, 9,9°C et 8,9°C respectivement dans les cellules avec les techniques de la peinture blanche (WP), l'isolation thermique (EPS) et l'ombrage (SH). De plus, la technique WP abaisse la température du plafond tout au long de la journée. En outre, la technique WP offre la plus grande réduction de la température de l'air intérieur de la cellule. Cette réduction a atteint 7,7°C; alors qu'elle était toujours inférieure à 6,9°C et 4,8°C pour les techniques EPS et SH, respectivement. En outre, la moyenne de cette réduction est respectivement de 6,5°C, 5,5°C et 3,7°C pour les techniques WP, EPS et SH. Enfin, grâce à ses excellentes propriétés de refroidissement radiatif, la technique WP a permis d'éviter la surchauffe nocturne enregistrée dans les cellules EPS et SH. Cependant, les bonnes performances de la dalle de toit peinte en blanc diminuent avec le temps en raison de l'accumulation de poussière. En conséquence, la technique WP conduit à un comportement similaire à celui de SH si elle n'est pas nettoyée ou renouvelée. D'autre part, le flux thermique à travers les dalles de toiture a été réduit, par rapport à la cellule de référence, de 84%, 66% et 59% respectivement dans les cellules dont le toit est isolé thermiquement, peint en blanc et ombragé. Nous pouvons conclure que la technique de peinture blanche reste la protection solaire la plus efficace pour le toit à condition que la peinture soit régulièrement entretenue comme évoqué précédemment. Cependant, comme l'isolation thermique du toit est nécessaire pendant les mois froids dans le climat chaud et semi-aride de Marrakech, il est suggéré d'associer les techniques de la peinture blanche et d'isolation thermique ou d'ombrage et d'isolation thermique (ombrage mobile). Enfin, il est clair que toute protection solaire et thermique doit être combinée avec une technique de dissipation, telle que la ventilation naturelle, afin de fixer des températures confortables à l'intérieur des cellules test. De plus, les performances thermiques du toit peint en blanc devraient être évaluées tout au long de l'année, surtout en hiver.

Après avoir compris le comportement thermique de ces techniques passives sur des modèles réduits, nous les avons appliquées dans la toiture d'un bâtiment réel pour évaluer la réelle plus-value qu'apportent ces techniques. À cette fin, nous avons construit un bâtiment à échelle nature qui représente une salle de classe au milieu rural. Les murs extérieurs sont construits en pisé stabilisé (5% du ciment). Un suivi expérimental et une modélisation dynamique ont été réalisés en parallèle. Les résultats numériques ont été validés par le biais des résultats expérimentaux (en hiver et en été). Dans un premier temps, nous avons étudié le comportement thermique et la performance énergétique de la technique de construction des murs en pisé stabilisé et ceci à travers en comparant le bâtiment réel (appelé RE.CASE) à un bâtiment hypothétique équivalent dont les murs sont construits en parpaing (appelé CONV.CASE). Les résultats de la simulation ont montré que les massifs en pisé permettent de stabiliser la température opérative du bâtiment avec une amplitude maximale qui ne dépasse pas 1,7°C pendant toute l'année, alors qu'elle dépasse 4,5°C dans le bâtiment CONV.CASE. En ce qui concerne les charges annuelles de chauffage et de refroidissement, elles s'élèvent à 120 kWh/m² dans le CONV.CASE alors qu'elles sont de 93 kWh/m² dans le RE.CASE. Ensuite, nous avons étudié le comportement thermique et la performance

énergétique de chacune des techniques passives étudiées auparavant. Pour cela, nous avons étudié des configurations où les techniques passives sont associées ou/et elles sont séparées. Cette étude paramétrique a confirmé les résultats expérimentaux obtenus sur les cellules test qui disent que la combinaison de la peinture blanche avec l'isolation thermique est la technique la plus performante dans le climat chaud et semi-aride, à condition que la peinture blanche soit renouvelée ou nettoyée régulièrement. En effet, l'isolation thermique du toit n'est pas assez performante pendant la période estivale car elle ne facilite pas la dissipation de la chaleur intérieure. Or, seule la peinture blanche permet de réduire la charge annuelle de refroidissement de 17% par rapport à un toit isolé thermiquement et peint en blanc. En revanche, l'isolation thermique est très bénéfique en hiver car elle permet de réduire la charge annuelle de chauffage de 67% par rapport à un toit peint en blanc et qui n'est pas isolé thermiquement. Dans cette étude, nous avons également effectué une comparaison entre les caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment étudié et celles exigées par le RTCM. Celle-ci a montré que les caractéristiques thermiques des murs massifs en pisé ne respectent pas le niveau exigé par ce règlement. Toutefois, ces murs ont une performance thermique très élevée et sont connus par leur capacité à stabiliser la température et l'humidité intérieures mais ce type de matériau de construction à grande inertie thermique n'est pas pris en considération dans l'approche prescriptive du RTCM. Cette approche est de ce fait inapplicable pour des bâtiments construits avec ces matériaux. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser des simulations thermiques afin de déterminer les besoins en chauffage et refroidissement de ce type de bâtiment afin de vérifier leur conformité au RTCM (l'approche performancielle).

En guise de perspectives, nous nous projetons dans un avenir proche de rendre le bâtiment étudié comme un bâtiment à énergie positive en y installant des panneaux photovoltaïques permettant de produire l'énergie électrique nécessaire pour l'usage du bâtiment en tant qu'une salle de classe. Cette thèse a permis de contribuer à ce travail en améliorant tout d'abord la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment par l'utilisation des matériaux biosourcés et l'intégration des techniques passives de protection solaire des toitures. D'autres paramètres sont proposés dans la suite de cette thèse de Doctorat afin d'augmenter l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment, à savoir ;

- Agrandir les surfaces vitrées du bâtiment pour profiter des apports solaires en hiver et remplacer le simple vitrage par un double pour limiter les déperditions.
- Etudier l'impact de la ventilation naturelle (free cooling) pendant les heures de cours à travers une étude approfondie sur l'outil TRNFLOW.
- Étudier l'influence de l'orientation des façades contenant des fenêtres.
- Étudier l'impact de l'épaisseur des murs porteurs sur la performance énergétique du bâtiment.
- Établir une étude paramétrique dans les six zones climatiques du Maroc afin de proposer des solutions adaptées à chaque climat.

Ces recommandations seront étudiées en vue de proposer un guide complet de construction des salles de classe dans le milieu rural qui sera destiné aux professionnels de construction.

Cela aidera les pouvoirs publics en charge de l'enseignement à construire des salles de classe en matériaux locaux, énergétiquement efficaces et thermiquement confortables.

RÉFÉRENCES

[**Adam et Jones, 1995**] Adam, E.A., Jones, P.J., Thermophysical properties of stabilised soil building blocks. *Building and Environment* 30, pp 245–253, 1995.

[**AFNOR, 1995**] AFNOR. "NF EN ISO 7730 : Ambiances thermiques modérées - Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique". 1995.

[**Al-Aturki et al, 1997**] Al-Turki A. M., Gari H. N., Zaki G. M., "Comparative study on reduction of cooling loads by roof gravel cover.", *Energy and Building*, vol. 25: pp. 1-5, 1997.

[**Al-Aturki et Zahi, 1991**] Al-Aturki A. M., Zahi G. Z., "Energy saving through intermittent roof cooling." *Energy and Building*, vol. 17: pp. 35-42, 1991.

[**AMEE, 2017**] Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique (AMEE), <http://www.amee.ma>. Consulté le 11 novembre 2017.

[**Amer, 2006**] Amer Emad H., "Passive options for solar cooling of building in arid areas", *Energy*, vol. 31: pp. 1332-1344, 2006.

[**Asdrubali et al, 2015**] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, S. Schiavoni, A review of unconventional sustainable building insulation materials, *Sustainable Materials and Technologies*, vol 4, pp 1-17, 2015.

[**ASHRAE, 1997**] ASHRAE, (1997), chap. 24: "thermal and water vapor transmission data" in *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.

[**ASHRAE, 2010**] ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, ASHRAE Environmental Conditions for human Occupancy. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc.

[**ASTM E2392/E2392M-10, 2010**] ASTM E2392/E2392M-10, Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org

[**Baglioni et al, 2016**] E. Baglioni, L. Rovero, U. Tonietti. Drâa valley earthen architecture: construction techniques, pathology and intervention criteria, *Journal of Materials Environmental Science*, vol.7, pp. 3499- 3508, 2016.

[**Ben Cheikh H., Bouchair, 2008**] Ben Cheikh H., Bouchair A., Experimental studies of a passive cooling roof in hot arid areas, *Energies Renouvelables*, vol. 11: pp. 515-522, 2008.

[**Benhamou & Bennouna, 2013**] B. Benhamou, A. Bennouna, "Energy Performances of a Passive Building in Marrakech: Parametric Study", *Energy Procedia*, Vol. 42, pp. 624-632, 2013.

- [Benmansour et al. 2014]** Benmansour N., B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building, *Energy and Buildings* 8, pp 98–104, 2014.
- [Boumhaout et al, 2017]** M. Boumhaout, L. Boukhattem, H. Hamdi, B. Benhamou, F. Ait Nouh. Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh, *Construction and Building Materials*, vol 135, pp 241-250, 2017.
- [Bozonnet, 2005]** E. Bozonnet, Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments Cas de la rue canyon, Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 2005.
- [Brangeon, 2012]** B. Brangeon, Contribution à l'étude numérique de la ventilation naturelle dans des cavités ouvertes par la simulation des grandes échelles. Application au rafraîchissement passif des bâtiments, Thèse de Doctorat, Université de La Réunion, France, 2012.
- [Bruce, 2008]** Bruce, K. The renaissance of earthen architecture. In 8th International Seminar on Structural Masonry (ISSM 08), Istanbul, Turkey, 2008.
- [Butera, 1994]** F.M. Butera, Energy and buildings in Mediterranean countries: Present and future. *Renewable Energy*, 5 Part II, pp. 942-949, 1994.
- [Chabriac, 2014]** Pierre-Antoine Chabriac, Mesure du comportement hygrothermique du pisé, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, ENTPE, 2014.
- [Chikhi, 2016]** Chikhi M., Young's modulus and thermophysical performances of bio-sourced materials based on date palm fibers, *Energy and Buildings* 129. pp 589–97, 2016.
- [Conceicao et Lucio, 2008]** E. Z. E. Conceicao, M. M. J. R. Lucio, Thermal study of school buildings in winter conditions, *Building and Environment*, vol 43, pp. 782-792, 2008.
- [CSIRO, 2000]** CSIRO. Mud walls give poor insulation, 2000.
- [CSTB, 2011]** CSTB, Analyse des caractéristiques des systèmes constructifs non industrialisés, 2011.
- [Djoudi et al. 2014]** Djoudi A., M. M. Khenfer, A. Bali, and T. Bouziani, Effect of the addition of date palm fibers on thermal properties of plaster concrete: experimental study and modeling, *Journal of Adhesion Science and Technology* 28 (20), pp 2100–2111, 2014.
- [Easton, 1996]** Easton, D. The Rammed Earth House. The Chelsea Green Publishing Company, Vermont, 1996.
- [El Fgaier et al, 2015]** F. El Fgaier, Z. Lafhaj, F. Brachelet, E. Antczak, C. Chapiseau, Thermal performance of unfired clay bricks used in construction in the north of France: Case study. *Case Studies in Construction Materials* 3, pp 102-111, 2015.

- [Fang et al, 2018]** Z. Fang, S. Zhang, Y. Cheng, Alan M.L. Fong, M. O. Oladokun, Z. Lin, H. Wu, Field study on adaptive thermal comfort in typical air conditioned classrooms, *Building and Environment*, vol 133, pp 73-82, 2018.
- [Fanger, 1970]** P. O. Fanger, "Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering", USA: McGraw-Hill Book Company, 1970.
- [FAOSTAT, 2015]** Food and agriculture organization of the United Nations statistics division. 2015. Données statistiques de production végétale, FAOSTAT Database. faostat3.fao.org.
- [Fathy, 1973]** Fathy Hassan. *Architecture for the Poor: An Experiment in Rural Egypt*, 1973
- [Fathy, 1986]** Fathy Hassan. *Natural Energy and Vernacular Architecture: Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*. University of Chicago Press, 1986
- [Fernandez, 2006]** Fernandez, J., Materials and construction for low-energy buildings in china. In *Sustainable Urban Housing in China*, L. Gliksman and J. Lin, Eds. Vol 9, Springer, Netherlands, pp. 44–73, 2006.
- [Garg et al, 2015]** V. Garg, R. Kotharkar, J. Sathaye, H. Rallapalli, N. Kulkarni, N. Reddy, P. Rao, A. Sarkar, Assessment of the impact of cool roofs in rural buildings in India, *Energy and Buildings*, vol 114: pp. 156-163, 2015.
- [Geetha et Velraj, 2012]** N. B. Geetha, R. Velraj, Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage - a review, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* vol 29(2): pp. 913-946, 2012.
- [Goodhew et Griffiths, 2005]** Goodhew, S., and Griffiths, R. Sustainable earth walls to meet the building regulations, *Energy and Buildings*, vol. 37, pp. 451–459, 2005.
- [Guechhati et al, 2010]** R. Guechhati, M. A. Moussaoui, Ahm. Mezrhab, Abd. Mezrhab, "Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments : Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda", *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 13, pp. 223-232, 2010.
- [Hall et Allinson, 2008]** Hall, M., and Allinson, D. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, vol 29, pp 740-747, 2008.
- [Hamdan et al, 2011]** Hamdan M.A., Yamin J, Abdel Hafez E.M., Passive cooling roof design under Jordanian climate, *Sustainable Cities and Society*, vol. 38: pp. 1-4, 2011.
- [Heathcote, 2011]** Heathcote, K., The thermal performance of earth buildings. *Informes de la Construcción*, vol 63, pp 117–126, 2011.
- [Houben et Guillaud, 2006]** Houben, H., and Guillaud, H., *Traité de Construction en Terre*, 3ème ed. Editions Parenthèses, 2006.

[Hoy-Yen Chan et al, 2010] Hoy-Yen Chan, Saffa B. Riffat, Jie Zhu, Review of passive solar heating and cooling technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 14, pp. 781-789, 2010.

[Humphreys et Nicol, 1998] Humphreys, M.A., and Nicol, J.F., Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transactions* 104 (1): pp 991-1004, 1998.

[IEA, 2014] International Energy Agency (IEA), "Politiques énergétiques hors des pays de l'AIE", <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Maroc2014.pdf>. Consulté le 30 mai 2018.

[Incropera, 1985] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, JohnWiley and Sons, 1985.

[Isaac et van Vuuren, 2009] M. Isaac, D. van Vuuren. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy policy*, vol 37, pp. 507-521, 2009.

[ISO 9869, 2014] ISO 9869, Isolation thermique - Éléments de construction - Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique, 2014.

[Jindal, 2018] A. Jindal, Thermal comfort study in naturally ventilated school classrooms in composite climate of India, *Building and Environment*, vol 142, pp 34-46, 2018.

[Kachkouch et al, 2018] S. Kachkouch, F. Ait-Nouh, B. Benhamou, K. Limam, Experimental assessment of thermal performance of three passive cooling techniques for roofs in a semi-arid climate, *Energy and Buildings*, Vol. 164, pp. 153-164, 2018.

[Karlsson et al. 2013] Karlsson J., Wadsö L., Öberg M., A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures, *Energy and Buildings*, vol 60, pp 146-151, 2013.

[Khabbaz, 2016] Contribution à l'étude d'un échangeur de chaleur air-sol (puits canadien) pour le rafraîchissement de l'air sous le climat chaud et semi-aride de Marrakech. Thèse de Doctorat en Cotutelle, Université Cadi Ayyad de Marrakech et Université de La Rochelle, 2016.

[Khanal & Lei, 2011] R. Khanal, C. Lei, Solar chimney - A passive strategy for natural ventilation, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 1811-1819, 2011.

[Kottek et al, 2006] Kottek M., Jurgen G., Christoph B., Bruno R., Franz R. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 15: pp. 259-263, 2006.

[Krikorian et al, 2003] Etude numérique de la ventilation traversante et de ses conséquences sur un bâtiment collectif d'habitation, VIe Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois Thermique des systèmes, 26-28 mai 2003, Québec.

[**Kusuda, 1965**] T. Kusuda, P. R. Achenbach, Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States, ASHRAE Transactions, 1965, Vol. 71, Part 1.

[**Laaouina et al, 2012**] D. Laaouina, B. Benhamou, A. Bennouna, "Étude théorique et expérimentale de l'effet de systèmes passifs sur la charge thermique d'une maison type villa à Marrakech", AUGC-IBPSA 2012, Chamberry-France, 6-8 juin 2012.

[**Laurent, 1986**] Laurent, J.P., 1986. Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires - Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Grenoble.

[**Loi 47-09, 2015**] Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, "Loi n°47-09 relative à l'efficacité énergétique dans le bâtiment", <http://www.mem.gov.ma/SitePages/TestesReglementaires/Loi47-09.pdf>. Consulté le 7 août 2018.

[**MacLeod, 2002**] MacLeod, D., The case for improving the performance of indigenous earth dwellings in rural south africa. Rapport technique, Agrément South Africa, 2002.

[**MAPM, 2015**] Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime. 2015. Directives Stratégiques Pour La Filière Phoéniciicole. Rabat, Morocco. <http://www.agriculture.gov.ma/>.

[**Mendonca, 2007**] Mendonca P., Non-structural adobe walls in housing buildings - environmental performance, International Symposium on Earthen Structures, Bangalore India, 22-24 Août 2007.

[**Meteonorm, 2014**] Meteonorm, 2014, v7.0.22.8. www.meteonorm.com. Consulté le 13 novembre 2017.

[**Minke, 2000**] Minke, G., 2000. Earth Construction Handbook - The building material earth in modern architecture

[**Miranville, 2002**] Miranville F., Contribution à l'Étude des Parois Complexes en Physique du Bâtiment : Modélisation, Expérimentation et Validation Expérimentale de Complexes de Toitures incluant des Produits Mince Réfléchissants en climat tropical humide, Thèse de Doctorat, Université de La Réunion, France, 2002.

[**Mitalas & Arsenault, 1972**] G. P. Mitalas, J. G. Arsenault, FORTRAN IV Program to calculate z-Transfer Functions for the calculation of transient heat transfer through walls and roofs, Division of National Research Council of Canada, Ottawa.

[**Mohsen & Akash, 2001**] M. S. Mohsen, B. A. Akash, Some Prospect of Energy Saving in Building, Energy Conversion Management, Vol. 42, pp. 1307-1315, 2001.

[**Morel et al, 2001**] Morel, J. C., Mesbah, A., Oggero, M., and Walker, P. Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. Building and Environment 36, pp. 1119–1126, 2001.

[**Mortensen, 1994**] Mortensen, N. The naturally air conditioned house. AIRAH Journal, pp 11-14, August 1994.

- [**Nahar et al, 1999**] Nahar N. M., Shamma P., Prurohit M. M., Studies on solar passive cooling techniques for arid areas, *Energy Conversion & Management*, vol. 40: pp. 89-95, 1999.
- [**Nahar et al, 2003**] Nahar N.M., Sharma P., Purohit M.M., Performance of different passive techniques for cooling of building in arid region, *Building and Environments* vol. 36: pp. 109-116, 2003.
- [**NM ISO 7730, 2010**] NM ISO 7730, Institut Marocain de Normalisation, Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local, 2010.
- [**Omer, 2008**] A.M. Omer. Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. *Renew Sustain Energy Rev*, vol 12, pp. 1562–1587, 2008.
- [**ONEE, 2018**] Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable, <http://www.one.org.ma/>. Consulté le 25 juillet 2018.
- [**Orosa et Oliveira 2012**] Orosa J.A, Oliveira A.C, A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment, *Renewable Energy*, vol 37, pp 89-96, 2012.
- [**Oushabi et al. 2015**] Oushabi A., S. Sair, Y. Abboud, O. Tanane, and A. El Bouari, Natural thermal-insulation materials composed of renewable resources: characterization of local date palm fibers (LDPF), *Journal of Materials and Environmental Science* 6 (12), pp 3395–3402, 2015.
- [**Pacheco et al, 2012**] R. Pacheco, J. Ordóñez, G. Martínez. Energy efficient design of building: a review. *Renew Sustain Energy Rev*, vol 16, pp. 3559–3573, 2012.
- [**Palme et al, 2014**] M. Palme, J. Guerra and Sergio Alfaro, Thermal Performance of Traditional and New Concept Houses in the Ancient Village of San Pedro De Atacama and Surroundings. *Sustainability*, vol 6(6), pp 3321-3337, 2014.
- [**Parc Eco-Habitat, 2011**] Comparatif global des isolants basée, 2011. <http://www.parc-ecohabitat.com/Files/30845/11264173150663.pdf>. Consulté le 30 Novembre 2017.
- [**Parra-Saldivar et Batty, 2006**] Parra-Saldivar, M. L., and Batty, W. Thermal behaviour of adobe constructions. *Building and Environment*, vol 41, pp 1892–1904, 2006.
- [**Paul et Taylor, 2008**] Paul, W. L., and Taylor, P. A. A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building. *Building and Environment*, vol 43, pp 1858–1870, 2008.
- [**Pearlmutter et Rosenfeld, 2008**] Pearlmutter D., Rosenfeld S., Performance analysis of a simple roof cooling system with irrigated soil and two shading alternatives, *Energy and Buildings*, vol. 40: pp. 855–864, 2008.

[Pérez et al, 2012] G. Pérez, J. Coma, C. Solé, A. Castell, L. F. Cabeza, "Green roofs as passive system for energy savings when using rubber crumbs as drainage layer", *Energy Procedia*, Vol. 30, pp. 452-460, 2012.

[Pomianowski et al, 2011] Michal Pomianowski, Per Heiselberg, Rasmus Lund Jensen, and Hicham Johra. NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT STORAGE AND HEAT CONDUCTIVITY IN THE CONCRETE HOLLOW CORE DECK ELEMENT. *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney, 14-16 November.

[Porta-Gandara et al, 2002] Porta-Gandara, M. A., Rubio, E., and Fernandez, J. L. Economic feasibility of passive ambient comfort in baja california dwellings. *Building and Environment*, vol 37, pp 993–1001, 2002.

[Reardon et al, 2013] Reardon, C., McGee, C., and Milne, G. (2013), *Passive Design - Thermal Mass Your Home Australia's Guide to Environmentally Sustainable Homes*: <http://www.yourhome.gov.au/passive-design/thermal-mass>. Consulté le 24 Décembre 2017.

[Reindl et al, 1990] D. T. Reindl, W. A. Beckman, J. A. Duffie, Diffuse fraction correlations, *Solar Energy*, Vol. 45, pp. 1-7, 1990.

[Reindl et al, 1990] D. T. Reindl, W. A. Beckman, J. A. Duffie, Evaluation of hourly tilted surface radiation models, *solar energy*, Vol. 45, pp. 9-17, 1990.

[Ricciardi et Buratti, 2018] P. Ricciardi, C. Buratti, Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions, *Building and Environment*, vol 127, pp 23-36, 2018.

[Rincón et al, 2000] Rincón J., Almaso N., Ganozalez E., "Experimental and numerical evaluation of solar passive cooling system under hot and humid climate conditions". *Solar Energy*, vol. 71: pp. 71–80, 2000.

[Romeo et Zinzi, 2013] 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 Building*, vol 67: pp. 647-657, 2013.

[RPACT, 2011] Décret n° 2-12-666 du 17 reheb 1434 (28 mai 2013). REGLEMENT PARASISMIQUE DES CONSTRUCTIONS EN TERRE. Bulletin officiel n°6206 du 17 moharrem 1435 (21-11-2013). (accès le 18 Octobre 2017)

[RT2000] Conductivité thermique des matériaux selon la norme NF EN 12524. Fascicule 2/5 – Matériaux. http://www.lamaisonpassive.fr/forum/Regles_TH-U2_5.pdf Consulté le 25 juin 2018.

[RTCM, 2014] RTCM, Règlement général de construction fixant les performances énergétiques des constructions, Décrit n° 2-13-874 du 15 octobre 2014, Publié au Bulletin Officiel du Royaume du Maroc no. 6306 du 6-11-2014 pp. 4256-4269.

- [**Sabzi et al, 2015**] D. Sabzi, P. Haseli, M. Jafarian, G. Karimi, M. Taheri, Investigation of cooling load reduction in buildings by passive cooling options applied on roof, *Energy and Building*, vol 109: pp. 135-142, 2015.
- [**Sadineni et al, 2011**] Suresh B. Sadineni, Srikanth Madala, Robert F.Boehm, Passive building energy savings: a review of building envelope components, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 15, pp. 3617-3631, 2011.
- [**Santamouris et al, 2007**] M. Santamouris, K. Pavlou, A. Synnefa, K. Niachou and D. Kolokotsa. Recent progress on passive cooling techniques: Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households. *Energy and Building*, vol 39, pp. 859-866, 2007.
- [**Santamouris, 2005**] M. Santamouris, *PASSIVE COOLING OF BUILDINGS*. Advances of Solar Energy, 2005, ISES, James and James Science Publishers, London.
- [**Schroeder, 2012**] H. Schroeder. Modern earth building codes, standards and normative development. *Modern Earth Buildings - Materials, Engineering, Constructions and Applications*. Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 72-109, 2012.
- [**Serrano et al, 2016**] Susana Serrano, Alvaro de Gracia, Luisa F. Cabeza. Adaptation of rammed earth to modern construction systems: Comparative study of thermal behavior under summer conditions. *Applied Energy*, vol 175, pp 180-188, 2016.
- [**SIEM, 2017**] Société d'Investissements Énergétiques Marocaine (SIEM), <http://www.siem.ma/potentiel-maroc>. Consulté le 2 juillet 2018.
- [**Sobhy et al, 2014**] I. Sobhy, A. Brakez, B. Benhamou, "Effect of thermal insulation and ground coupling on thermal load of a modern house in Marrakech", *IEEE Xplore*, DOI: 10.1109/IRSEC.2014.7059797, pp. 425-430.
- [**Sobhy et al, 2017**] I. Sobhy, A. Brakez, B. Benhamou, Analysis for thermal behavior and energy savings of a semi-detached house with different insulation strategies in a hot semi-arid climate, *J. Green Build.* Vol 12, pp 78–106, 2017.
- [**Sobhy, 2017**] Modélisation thermo-aéraulique et monitoring d'un bâtiment résidentiel sous un climat semi-aride et évaluation de ses performances énergétique avant et après rénovation. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad de Marrakech, 2017.
- [**Soebarto, 2009**] Veronica Soebarto. Analysis of indoor performance of houses using rammed earth walls. *Building Simulation 2009*. Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland July 27-30, 2009.
- [**Soudani et al, 2016**] Lucile Soudani, Monika Woloszyn, Antonin Fabbri, Jean-Claude Morel, Anne-Cécile Grillet. Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements. *Solar Energy*, vol 141, pp 70-80, 2016.

- [Synnefa et al, 2012] A. Synnefa, M. Saliari, M. Santamouris, Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens, *Energy and Buildings*, vol 55: pp. 7-15, 2012.
- [Tajero-Gonzalez et al, 2016] A. Tajero-Gonzalez, M. Andrés-Chicote, P. Garcia-Ibanez, E. Velasco-Gomez, FJ. Rey-Martinez, Assessing the applicability of passive cooling and heating techniques through climates factors: an overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 65, pp. 727-742, 2016.
- [Takakura et al, 2000] Takakura T., Kitade S., Goto E., Cooling effect of greenery cover over a building, *Energy and Building*, vol. 31: pp. 1-6, 2000.
- [Taylor et al, 2008] Taylor, P., Fuller, R. J., and Luther, M. B., Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. *Energy and Building*, vol 40, pp 793– 800, 2008.
- [Taylor et Luther, 2004] Taylor, P., and Luther, M. B. Evaluating rammed earth walls: a case study. *Solar Energy*, vol 76, pp 79–84, 2004.
- [Theodosiou, 2003] Theodosiou, T.G., Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*. 35(9), pp. 909-917, 2003.
- [Toguyeni et al, 2012] D. Y. K. Toguyeni, O. Coulibaly, A. Ouedraogo, J. Koulidiati, Y. Dutil, D. Rouse, Study of the influence of roof insulation involving local materials on cooling loads of houses built of clay and straw, *Energy and Buildings*, Vol. 50, pp. 74-80, 2012.
- [TRNSYS, 2010] Transient System Simulation Tool (TRNSYS). Reference manual, volume 5: Multizone Building modeling, Madison, WI, USA, 2010.
- [Walker et al, 2005] Walker, P., Keable, R., Martin, J., and Maniatidis, V. Rammed earth: Design and construction guidelines. BRE Bookshop, 2005.
- [Xinxin et al, 2016] Lin Xinxin, Wang Meiyuan, Hiroatsu Fukuda. The Analysis and Optimization of Anji Rammed Earth House's Envelope Thermal Characteristic, vol 216, pp 754-765, 2016.
- [Yang et al, 2018] B. Yang, T. Olofsson, F. Wang, W. Lu, Thermal comfort in primary school classrooms: A case study under subarctic climate area of Sweden, *Building and Environment*, vol 135, pp 237-245, 2018.
- [Zinzi & Agnoli, 2012] M. Zinzi, S. Agnoli, Cool and green roofs: An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region, *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 66-76, 2012.

ANNEXES

1. ANNEXE I : Description du logiciel TRNSYS

Le logiciel commercial TRNSYS est un outil qui permet de réaliser les simulations thermiques dynamiques des bâtiments ou d'autres systèmes thermiques. Ce logiciel existe depuis 1975 et il a été développé aux États-Unis par le Solar Energy Laboratory de l'Université Madison. Il est largement utilisé dans la recherche scientifique puisqu'il dispose d'une interface graphique plus aisée, d'une plus grande rapidité de prise en main et permet d'ajouter des types écrits soit en Fortran, C, C ++, Pascal ou d'autres langages de programmation. En outre, TRNSYS contient 50 familles de composants dans sa bibliothèque (données météorologiques, traceurs en ligne, équipements de chauffage et de refroidissement, régulateurs, etc.). D'autre part, TRNSYS peut facilement être connecté à d'autres logiciels ou applications comme Excel, COMIS (pour les aspects aérauliques), CONTAM (pour les aspects polluants), Matlab, etc.

TRNSYS se base sur la méthode de modélisation nodale. Cette méthode considère chaque zone d'un bâtiment en tant que volume homogène avec un nœud unique. Ainsi, chaque zone peut être caractérisée par un nœud de pression, un nœud pour la température, etc. L'hypothèse d'une zone homogène présente l'intérêt de pouvoir se limiter à un seul nœud pour la caractérisation de l'ambiance au sein d'une zone du bâtiment. Les équations régissant les transferts de masse et de chaleur sont alors considérablement simplifiées et les outils utilisant cette méthode permettent ainsi de prédire rapidement le comportement thermique d'un bâtiment sur de longues périodes, telles qu'une saison ou une année entière. TRNSYS est principalement utilisé pour la simulation thermique des bâtiments (mono zone ou multi zone) en fonction de plusieurs paramètres comme l'architecture, les matériaux de construction et les données climatiques. Par conséquent, TRNSYS permet d'évaluer la performance thermique par le calcul des températures ou la performance énergétique par le calcul des consommations (chauffage, refroidissement, etc.). La simulation de la cellule test à échelle réelle a été faite par la version 17.01.0025 du logiciel TRNSYS.

2. ANNEXE II : Description mathématique des Types utilisés sur TRNSYS

Il existe plusieurs modèles pour simuler un bâtiment mono-zone comme le Type 19. Cependant, nous avons choisi d'utiliser le Type 56 qui regroupe toutes les fonctionnalités du Type 19 et il est facile d'utilisation grâce à son interface TRNBuild. Soulignons, qu'il reste le modèle toujours recommandé pour simuler la plupart des configurations de bâtiments [TRNSYS, 2010].

2.1. Type 56 (TRNBUILD)

Le Type 56 est un composant de TRNSYS qui modélise le comportement thermique d'un bâtiment en une seule zone ou divisé en différentes zones de température. Le programme TRNBuild est l'interface graphique de Type 56 qui génère un fichier (*.b17) contenant la description du bâtiment. Ce fichier est ensuite utilisé lors de la simulation thermique. Les entrées et sorties de Type 56 dépendent de la description du bâtiment et des besoins de l'utilisateur. TRNBuild génère un dossier d'informations décrivant les sorties et les entrées nécessaires pour le Type 56.

Le modèle de bâtiment dans le Type 56 est un modèle équilibré non géométrique avec un nœud d'air par zone, représentant la capacité thermique du volume d'air de la zone et des capacités qui sont étroitement liées au nœud d'air (meubles, par exemple). Ainsi, la capacité du nœud est une entrée séparée en plus du volume de la zone. Ce qui suit présente la description mathématique des différents modes de transferts dans un modèle de bâtiment dans le Type 56.

- **Transferts par convection sur un nœud d'air**

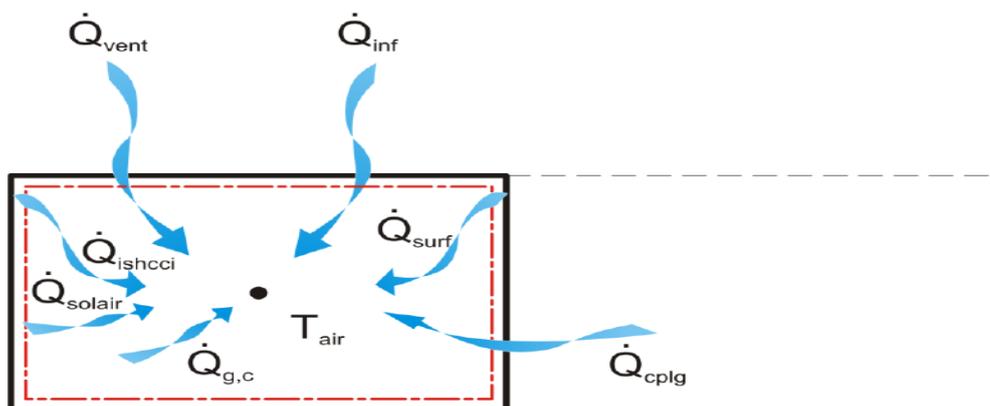


Figure II.1. Les flux de chaleur convectifs sur le nœud d'air de la zone [TRNSYS, 2010]

La Figure II.1 présente les flux de chaleur convectifs sur un nœud d'air de la zone [TRNSYS, 2010]. Le flux de chaleur convectif reçu par un nœud d'air d'une zone est la somme des flux de chaleur convectifs provenant des différentes surfaces de cette zone. Ces flux sont définis par les équations suivantes:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{solair,i} + \dot{Q}_{ISHCCI,i} \quad (II.1)$$

Avec,

$\dot{Q}_{surf,i}$ Les flux convectifs des parois intérieures, donné par :

$$\dot{Q}_{surf,i} = U_{w,i} A_{w,i} (T_{paroi} - T_{air}) \quad (II.2)$$

$\dot{Q}_{inf,i}$ Les flux d'infiltration provenant de l'extérieur, donné par :

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{V} \rho C_p (T_{ext,i} - T_{air}) \quad (II.3)$$

$\dot{Q}_{vent,i}$ Les flux de ventilation provenant d'une source définie par l'utilisateur, donné par :

$$\dot{Q}_{vent,i} = \dot{V} \rho C_p (T_{vent,i} - T_{air}) \quad (II.4)$$

$\dot{Q}_{g,c,i}$ Les flux convectifs internes (par les occupants, les radiateurs, l'éclairage, etc.)

$\dot{Q}_{cplg,i}$ Les flux convectifs résultants d'un flux d'air entre les zones, donné par :

$$\dot{Q}_{cplg,i} = \dot{V} \rho C_p (T_{zone,i} - T_{air}) \quad (II.5)$$

$\dot{Q}_{solair,i}$ Les flux entrant dans la zone à travers les fenêtres externes et qui sont immédiatement transférés en gain convectif à l'air intérieur.

$\dot{Q}_{ISHCCI,i}$ Le rayonnement solaire absorbé par les dispositifs internes d'ombrage dans la zone, qui sont directement transférés à un flux convectif dans l'air intérieur.

- **Transferts radiatifs sur un nœud d'air**

Pour les échanges radiatifs, TRNSYS distingue les échanges de courtes longueurs d'onde (CLO) correspondant à des longueurs d'onde inférieures à 2,5 μm et les grandes longueurs d'onde supérieure à 2,5 μm (GLO). En effet, le transfert de chaleur radiatif interne pour une paroi de la zone reçu par un nœud, est la somme des gains internes radiatifs à la zone. La figure II.2 montre les flux de chaleur radiatif interne d'une paroi de la zone reçus par un nœud [TRNSYS, 2010].

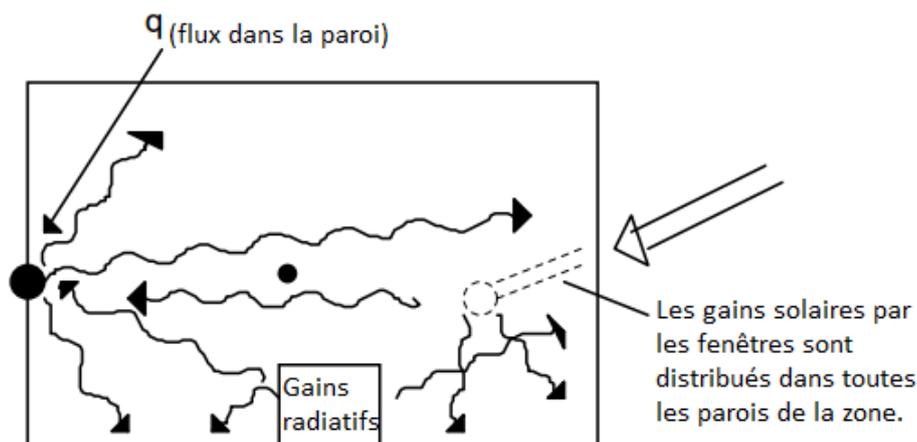


Figure II.2. Flux de chaleur radiatifs dans une paroi [TRNSYS, 2010]

Les flux radiatifs reçus par un nœud surfacique d'une paroi (\dot{Q}_{r,w_i}) sont calculés par l'équation suivante :

$$\dot{Q}_{r,w_i} = \dot{Q}_{g,r,i,w_i} + \dot{Q}_{sol,w_i} + \dot{Q}_{long,w_i} + \dot{Q}_{wall-gain} \quad (II.6)$$

Avec,

\dot{Q}_{g,r,i,w_i} Les gains internes radiatifs reçus par une paroi.

\dot{Q}_{sol,w_i} Les gains solaires reçus par une paroi à travers les fenêtres.

\dot{Q}_{long,w_i} Les flux résultants des transferts de chaleur par rayonnement entre une paroi et les autres parois de la zone.

$\dot{Q}_{wall-gain}$ Le flux de chaleur radiatif spécifique à une paroi.

Pour les parois externes, les échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde sur la surface extérieure sont considérés explicitement en utilisant une température de ciel fictive ($T_{f,sky}$) qui est une entrée pour le modèle Type 56 et un facteur de vue pour le ciel ($f_{s,sky}$).

$$\Phi_{GLO} = \sigma * \varepsilon_{s,o} * (T_{s,o}^4 - T_{f,sky}^4) + S_{s,o} \quad (II.7)$$

$$T_{f,sky} = (1 - f_{s,sky}) * T_{s,ground} - f_{s,sky} * T_{sky} \quad (II.8)$$

Nous notons que l'ombrage des murs et des fenêtres se fait par TRNBUILD via le programme TRNSHD qui effectue des calculs d'ombrage externe et d'isolation pour une configuration géométrique donnée. En effet, il détermine la quantité d'énergie solaire qui atteint les murs extérieurs du bâtiment ainsi que ses fenêtres.

- **Transferts thermiques à travers les murs**

Les parois sont modélisées selon les fonctions de transfert de Mitalas et Arseneault [Mitalas et Arseneault, 1972] définies de surface en surface. La figure II.3 montre les flux de chaleur et les températures qui caractérisent le comportement thermique d'un mur ou d'une fenêtre.

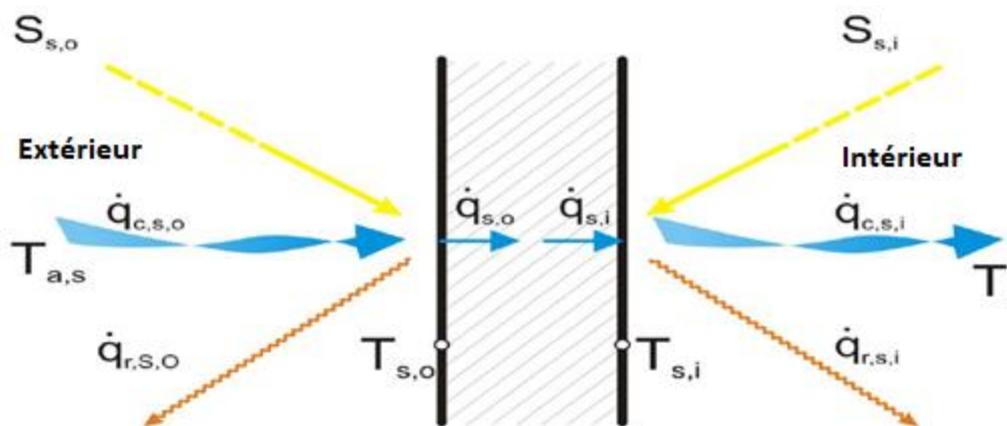


Figure II.3. Flux de chaleur et températures dans une paroi [TRNSYS, 2010]

Avec,

$S_{s,i}$ Le rayonnement de courtes longueurs d'ondes absorbé par la surface intérieure (les flux solaires et radiatifs).

$S_{s,o}$ Le rayonnement de courtes longueurs d'ondes absorbé par la surface extérieure (les flux solaires).

$\dot{q}_{r,s,i}$ Le flux net radiatif de grandes longueurs d'ondes échangé avec toutes les autres surfaces de la zone.

$\dot{q}_{r,s,o}$ Le flux net radiatif échangé avec toutes les surfaces extérieures à la zone.

$\dot{q}_{w,g,i}$ Le flux dans la paroi ou dans la surface de la fenêtre définit par l'utilisateur.

$\dot{q}_{s,i}$ Le flux conductif dans le mur vers la surface interne.

$\dot{q}_{s,o}$ Le flux conductif dans le mur à partir de la surface externe.

$\dot{q}_{c,s,i}$ Le flux convectif à partir de la surface interne du mur vers l'air de la zone.

$\dot{q}_{c,s,o}$ Le flux convectif à partir de la surface externe du mur vers l'air ambiant.

$T_{s,i}$ La température de la surface interne du mur.

$T_{s,o}$ La température de la surface externe du mur.

T_i La température du nœud de la zone.

$T_{a,s}$ La température de l'air ambiant.

Pour une paroi, le transfert de chaleur par conduction au niveau des surfaces est donné par les équations suivantes [TRNSYS, 2010].

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,i}^k \quad (\text{II.9})$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,o}^k \quad (\text{II.10})$$

Ces équations de séries temporelles en termes de températures de surface et de flux de chaleur sont évaluées à des intervalles de temps égaux. L'exposant k fait référence à la limite de la série chronologique. L'heure actuelle est k = 0, l'heure précédente est pour k = 1, etc. La base de temps sur laquelle ces calculs sont basés est spécifiée par l'utilisateur dans la description du bâtiment sur TRNBUILD. Les coefficients de la série temporelle (a_s , b_s , c_s et d_s) sont déterminés dans le programme TRNBUILD en utilisant les fonctions de la transformé en Z. Le calcul de ces coefficients intègre les caractéristiques thermo-physiques des couches constituant le mur.

La méthode de la fonction de transfert peut être décrite comme une approche pour évaluer "l'histoire thermique" du mur. Le mur est considéré comme une boîte noire. Le nombre de pas de temps (k) lié à la base de temps (définie par l'utilisateur) montre si le mur est un mur lourd avec une masse thermique élevée (k < 20) ou si seulement quelques pas de temps doivent être considéré pour décrire le comportement thermique de ce mur. Si la base de temps du mur considéré est supérieure au pas de temps de simulation, le calcul des coefficients de la matrice de la fonction de transfert est arrêté. Une paroi "mince" peut donc être remplacée par une définition de résistance négligeant la masse thermique.

D'autre part, les coefficients de transfert de chaleur combinés ne sont pas utilisés pendant la simulation. Pour le calcul des valeurs U indiquées dans le fichier d'information (* .INF), les

coefficients de transfert de chaleur combinés α_i (convectif) et α_o (radiatif) suivants qui ont été utilisés pour le calcul prédictif [TRNSYS, 2010]:

$$\frac{1}{\alpha_i} = 0,13 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}^{-1}$$

$$\frac{1}{\alpha_o} = 0,04 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}^{-1}$$

Une simulation dynamique prenant en compte la masse thermique d'un élément de paroi n'utilise pas ces valeurs explicitement, mais décrit la résistance thermique implicite dans les flux de chaleur transitoires entrant et sortant des surfaces de paroi.

- **Transferts thermiques à travers les fenêtres**

Une fenêtre est considérée thermiquement comme un mur extérieur sans masse thermique, partiellement transparent à l'énergie solaire, mais opaque aux gains internes à ondes longues. L'absorption des ondes longues est considérée comme se produisant uniquement sur les surfaces. Dans le calcul du bilan énergétique du Type 56, la fenêtre est décrite comme un modèle à deux nœuds représenté sur la figure II.4. Les équations (II.9) et (II.10) sont valables pour une fenêtre avec:

$$a_s^0 = b_s^0 = c_s^0 = d_s^0 = U_{g,s}$$

$$a_s^k = b_s^k = c_s^k = d_s^k = 0 \quad \text{for } k > 0$$

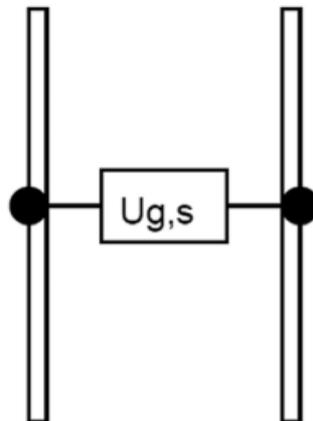


Figure II.4. Modèle de fenêtre avec deux nœuds [TRNSYS, 2010]

- **Calcul de la température dans un nœud (Pas de chauffage et refroidissement)**

La température d'un nœud (qui représente une zone thermique) est calculée par l'équation II.11 [TRNSYS, 2010].

$$C_i \cdot \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i \quad (\text{II.11})$$

- **Calcul de la charge thermique dans un nœud**

La charge thermique dans une zone est la quantité d'énergie à lui fournir durant une période donnée pour maintenir une température fixe, appelée température de consigne. Cette charge thermique est négative pour le chauffage et positive pour le refroidissement. En effet, elle dépend parfaitement de la température de l'air de la zone thermique comme il est indiqué sur la figure II.5 [TRNSYS, 2010].

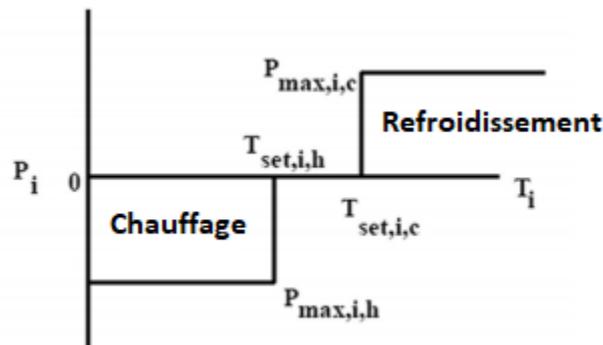


Figure II.5. Puissance thermique en fonction de la température [TRNSYS, 2010]

Avec, P_i la puissance thermique pour la zone i

$P_{max,i}$ la valeur absolue de la puissance maximale pour la zone i

$T_{set,i}$ les températures de consigne de chauffage ou de refroidissement dans la zone i

L'équation II.11 peut être réécrite pour inclure la puissance thermique.

$$C_i \cdot \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i - P_i \quad (\text{II.12})$$

- **Calcul des coefficients de convection**

Les coefficients de transfert de chaleur par convection sont calculés automatiquement pour les surfaces intérieures uniquement, par l'équation II.13. Les paramètres C et n sont donnés pour chaque type de paroi dans le tableau II.1 [TRNSYS, 2010]. Cependant, pour les surfaces extérieures, nous avons utilisé la corrélation donnée par l'équation II.14 [Incropera, 1985] qui prend en compte la vitesse du vent (donnée météorologique). Cette équation est ensuite reliée au Type 56.

$$h_{inside} = C(T_{surf} - T_{air})^n \quad (\text{II.13})$$

$$h_{outside} = 2,8 + 3,2 * V \quad (\text{II.14})$$

Type de paroi	C (kJ.m ⁻² .K ⁻¹)	n
Toit	7,20	0,31
Plancher	3,88	0,31
Murs verticaux	5,76	0,30

Tableau II.1. Paramètres de calcul des coefficients de convection pour les surfaces intérieures (II.13) [TRNSYS, 2010]

- **Masse thermique**

Le Type 56 considère que la zone ne contient que de l'air, ce qui n'est pas toujours le cas. Ce qui fait que la capacité thermique est réglée par défaut de 1,2 kg.m⁻³ (masse volumique de l'air) multipliée par 1 kJ.kg⁻¹.K⁻¹ (la chaleur massique de l'air dans les conditions standards) et le volume de la zone [TRNSYS, 2010]. Dans notre cas, il n'y a pas de murs intérieurs ni de meubles qui doivent être pris en considération.

Le Type 56 présente certains problèmes qui proviennent de la méthode utilisée pour modéliser la conduction thermique dans les murs. Il s'agit de la méthode des fonctions de transfert. Pour un mur hautement isolé et/ou lourd, la méthode est incapable de générer, pour un pas de temps court, les coefficients supposés représenter la réponse thermique du mur en question. Il est donc nécessaire d'ajuster la base de temps de la fonction de transfert si nécessaire. La valeur par défaut de 1 est adéquate dans la plupart des cas. Pour les constructions lourdes, 2 à 4 peuvent être utilisés, 0,5 pour les murs légers [TRNSYS, 2010].

2.2. Type 33 (Psychrométrie)

Ce composant est utilisé pour calculer différentes propriétés de l'air humide. Il prend en entrée : la température sèche et une autre propriété, selon le mode : température humide, humidité relative, température de point de rosée, taux d'humidité, ou enthalpie; ou le taux d'humidité et l'enthalpie. Il appelle le sous-programme 'Psychrometrics' pour calculer le taux d'humidité, la température humide, l'enthalpie, la densité de mélange air-eau, densité de l'air sec uniquement, humidité relative (en pourcentage), température sèche du bulbe et température du point de rosée [TRNSYS, 2010].

2.3. Type 69 (Température effective du ciel)

Une température effective du ciel est utilisée pour calculer l'échange de rayonnement de grande longueur d'onde depuis les surfaces externes vers l'atmosphère. Pour ce calcul, le ciel est supposé être une surface noire idéale. L'émissivité réelle du ciel clair et nuageux doit être connue. Ainsi, la température effective du ciel est fonction de la température ambiante, de l'humidité de l'air, du facteur de nébulosité du ciel et de la pression atmosphérique locale.

Si les données météorologiques n'incluent pas le facteur de nébulosité du ciel, ce facteur peut être déterminé selon l'équation II.13 [TRNSYS, 2010]. Pour le facteur de nébulosité nocturne, un facteur moyenné sur l'après-midi est utilisé.

$$C_{Cover} = (1,4286 * \frac{E_{Dif}}{E_{Glob,H}} - 0,3)^{0,5} \quad (II.15)$$

La pression atmosphérique est déterminée en fonction de la formule barométrique de l'altitude pour le lieu en question [TRNSYS, 2010].

$$p_{atm} = p_0 * e^{\frac{g\rho_0 h}{p_0}} \quad (II.16)$$

L'émissivité du ciel clair peut être déduite à partir la température de saturation, T_{sat} , qui correspond aux conditions ambiantes (température et humidité de l'air) [TRNSYS, 2010].

$$\varepsilon_0 = 0,71 + 0,005T_{sat} + 7,3 \cdot 10^{-5} * T_{sat}^2 + 0,013 \cos \left[2\pi \frac{time}{24} \right] + 12 \cdot 10^{-5} (p_{atm} - p_0) \quad (II.17)$$

La température effective du ciel peut alors être déterminée par l'équation suivante [TRNSYS, 2010] :

$$T_{sky} = T_{amb} * (\varepsilon_0 + 0,8 * (1 - \varepsilon_0) * C_{Cover})^{0,25} \quad (II.18)$$

2.4. Type 99 (Lecteur des fichiers météorologiques)

Ce composant permet la lecture des données climatiques à des intervalles de temps réguliers à partir des fichiers météorologiques de plusieurs formats standards ou d'un format spécifié par l'utilisateur.

- **Calcul du rayonnement solaire sur les surfaces verticales**

Seul le rayonnement solaire global sur un plan horizontal est mesuré par la station météorologique installée au toit du CNEREE. Cependant, la simulation thermique dynamique du bâtiment nécessite aussi les données du rayonnement solaire direct et diffus. En effet, le Type 99 permet l'estimation de ces données en utilisant la corrélation de [Reindl et al, 1990]. Par conséquent, il génère des sorties de rayonnement direct et diffus pour un nombre arbitraire de surfaces avec une inclinaison et un angle d'azimut bien précis, en sachant que les sorties standards sont la température sèche, le rayonnement global, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, etc.

L'estimation de la fraction du rayonnement solaire diffus est faite à partir du rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale (I_d/I), par l'utilisation des corrélations suivantes :

Pour l'intervalle : $0 \leq k_T \leq 0,3$; Contrainte : $I_d/I \leq 1$

$$I_d/I = 1,020 - 0,254 k_T + 0,0123 \sin(\alpha_a) \quad (II.19)$$

Pour l'intervalle : $0,3 < k_T < 0,78$; Contrainte : $0,1 \leq I_d/I \leq 0,97$

$$I_d/I = 1,400 - 1,749 k_T + 0,177 \sin (\alpha_a) \quad (\text{II.20})$$

Pour l'intervalle : $0,78 < k_T$; Contrainte : $0,1 \leq I_d/I$

$$I_d/I = 0,486 k_T - 0,182 \sin (\alpha_a) \quad (\text{II.21})$$

Le rayonnement solaire direct sur une surface horizontale est calculé par la différence entre le rayonnement solaire global et le rayonnement solaire diffus sur une surface horizontale.

$$I_b = I - I_d \quad (\text{II.22})$$

Pour le calcul du rayonnement solaire direct incident sur des surfaces verticales, le Type 99 utilise le facteur géométrique R_b donné par l'équation II.23. Ensuite, le facteur R_b de chaque surface est multiplié par le rayonnement solaire direct sur une surface horizontale (I_b). Le rayonnement solaire direct incident sur les surfaces verticales est donc donné par l'équation II.25.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{II.23})$$

$$\text{Avec } \cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \cos (\gamma_z - \gamma) \sin \beta \quad (\text{II.24})$$

$$I_{BT} = I_b * R_b \quad (\text{II.25})$$

D'autre part, le Type 99 utilise le facteur géométrique R_d pour calculer le rayonnement solaire diffus sur les surfaces verticales. Ce facteur est donné par l'équation (II.26). Ensuite, le facteur R_d de chaque surface est multiplié par le rayonnement solaire diffus sur une surface horizontale I_d . Le rayonnement solaire diffus incident sur les surfaces verticales est donc donné par l'équation II.26.

$$R_d = 0,5 * (1 + \cos \beta) \quad (\text{II.26})$$

2.5. Type 77 (Température de sol)

Ce composant modélise la distribution verticale des températures du sol compte tenu de la température moyenne de surface du sol pour l'année qui est typiquement la moyenne annuelle de la température de l'air au lieu considéré selon [Bozonnet, 2005] et [Kusuda, 1965]. Ce dernier [Kusuda, 1965] a trouvé que la température du sol non perturbé est fonction de la période de l'année et de la profondeur sous la surface et pourrait être décrite par la corrélation suivante:

$$T = T_{\text{mean}} - T_{\text{amp}} * \exp \left[-\text{depth} * \left(\frac{\pi}{365\alpha} \right)^{0,5} \right] \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \left[t_{\text{now}} - t_{\text{shift}} - \frac{\text{depth}}{2} * \left(\frac{365}{\pi\alpha} \right)^{0,5} \right] \right\} \quad (\text{II.27})$$

2.6. Type 65 (Traceur en ligne)

Ce composant graphique est utilisé pour afficher les variables sélectionnées à des intervalles de temps spécifiés pendant la progression de la simulation. Ce composant est fortement recommandé et largement utilisé car il fournit des informations variables précieuses et permet aux utilisateurs de voir immédiatement si le système ne fonctionne pas correctement. Les

variables sélectionnées seront affichées dans une fenêtre de tracé distincte à l'écran. Ainsi, un fichier contenant les variables sélectionnées est créé au cours de la simulation.