



patrimoine, ville et bâtiment

# CARACTÉRISATION THERMOPHYSIQUE ET SUIVI THERMIQUE DE DEUX BÂTISSES RÉALISÉES EN BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE

**H. BENOUALI<sup>1</sup>, A. BRARA<sup>1</sup>, M. MAHDAD<sup>1</sup>, F. MOKHTARI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Centre national d'études et recherches intégrées au bâtiment, CNERIB

<sup>2</sup> Centre de développement des énergies renouvelables, CDER

## 1. INTRODUCTION

La part importante de l'énergie consommée pour les besoins de fonctionnement des bâtiments (Senicat, 2008), couplé à l'augmentation sans cesse croissante du prix de l'énergie, a amené les chercheurs à s'intéresser aux problèmes de la thermique du bâtiment. A ce sujet et contrairement aux matériaux traditionnels à fort impact environnemental, la terre peut être utilisée comme matériau de construction sans dépenser de l'énergie (Houben, 1997). Son emploi associé à une architecture climatique est une solution attractive pour la réalisation de maisons à fonctionnement passif.

En Algérie, le regain d'intérêt pour ce matériau s'explique d'abord par la volonté de réaliser une partie du programme consacré au logement rural (environ 40%), ensuite par le souci d'adapter la législation au nouveau contexte international en matière du développement durable. Dans cet esprit, une loi sur la promotion des Energies Renouvelables a été d'ailleurs promulguée en août 2004.

Concernant la bibliographie relative au sujet, peu d'études consacrées au suivi thermique des constructions en terre est à relever dans la littérature. Entre autres, une étude

entreprise sur un habitat réalisé en adobe dans le Sud Algérien, a montré la bonne adaptation de ce mode au climat (Benhabib et al., 1994). Dans l'optique de faire revivre en France la tradition de construction en Bauge mécanisé, les travaux menés sur une cellule en modèle réduit réalisée au laboratoire, ont confirmé la bonne inertie thermique des parois ainsi qu'une stabilité de la température de l'ambiance interne, (Marmoret, 2004). Enfin, les travaux menés sur une maison rurale réalisé en murs de briques d'adobe et toiture en voûte en terre dans la région du Sahel, a montré le caractère confortable de ce type d'habitat, (Wyss et al, 2007). Cependant, en raison de la grande variabilité du matériau terre qui autorise une diversité des modes de mise en œuvre, les performances thermiques sont encore non estimées et restent à définir pour les autres modes. D'où l'intérêt porté au mode de construction en bloc de terre comprimée (BTC) pour lequel, un important travail expérimental a été mené au CNERIB sur deux maisons réalisées avec ce matériau, l'une dans le cadre du projet de recherche relevant d'un programme sectoriel du ministère de l'habitat désigné PB, et l'autre dans le cadre d'un projet euro-méditerranéen sur l'efficacité énergétique désigné PM.





Prototype MEDENEC (PM)



Prototype Bioclimatique (PB)

Photo 1. Bâtisses en BTC réalisés au CNERIB

Cet article expose les principaux résultats de la campagne de mesure et met en relief les tendances fortes observables sur le terrain.

## 2. DESCRIPTION DES DEUX BÂTISSES INSTRUMENTÉES

Les deux bâtisses désignées respectivement PB et PM, d'environ 80 m<sup>2</sup> de surface habitable chacune et obéissant au principe du bioclimatique, sont toutes deux réalisées en

R-D-C, sur un même site, avec le même matériau et le même mode de construction, mais avec des différences au niveau de la conception des murs et des toitures. Le prototype B (PB) (Ph.1) est en mur porteur homogène de blocs de terre comprimée (fig.2) avec une toiture plate (fig.1) comportant une couche d'isolation en liège, alors que pour le prototype M (PM) (Ph.1), les murs sont isolés par l'extérieur par 9 cm de polystyrène expansé (PES) (fig.2) et une toiture plate isolée par 16 cm de PES et surmonté par une couverture inclinée en tuiles, sur laquelle est disposée une surface de 8 m<sup>2</sup> de panneaux solaires.

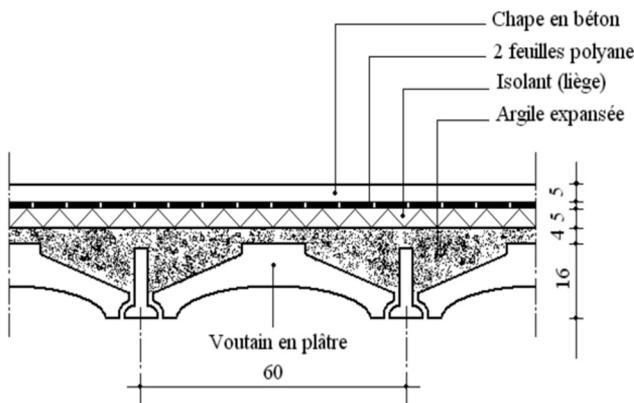


Figure 1. Composition de la toiture (prototype bioclimatique).

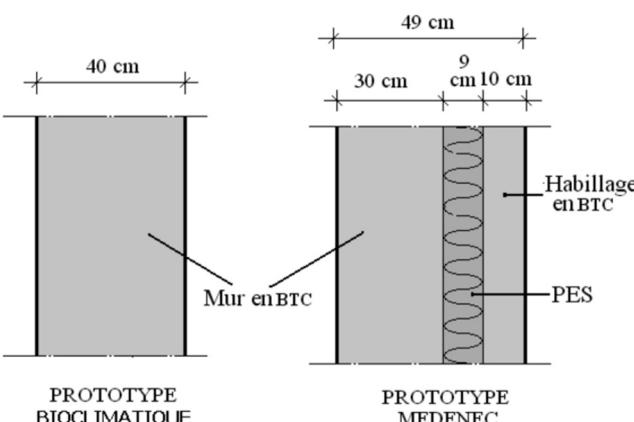


Figure 2. Conception du mur dans chaque cas.

## 3. CARACTÉRISTIQUES THERMOPHYSIQUES DES BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE

Des échantillons de blocs de terre ont été extraits des deux bâtisses (fig.1). L'extraction a été préférée à la confection et ce, pour tenir compte de la compacité réelle du matériau en place. Ces échantillons ont par la suite été découpés aux dimensions suivantes : 14 × 14 × 5 cm<sup>3</sup>. Afin de présenter des surfaces lisses et planes au contact des sondes (précision ± 5%), les faces des blocs ont été poncées. Le dispositif utilisé (Ph.2), permet de déterminer expérimentalement la conductivité thermique ( $\lambda$ ) et la chaleur spécifique ( $C_p$ ) conformément à la norme NF EN 993-15 de 2005.

Connaissant la conductivité thermique ( $\lambda$ ) et la chaleur spécifique ( $C_p$ ), la diffusivité thermique ( $\alpha$ ) et l'effusivité thermique ( $b$ ) sont déduites à partir des relations théoriques suivantes :

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p) \quad [1]$$

$$b = \sqrt{(\lambda \cdot \rho \cdot c_p)} \quad [2]$$

Avec  $\rho$ , la masse volumique apparente de l'échantillon, déterminée après séchage dans une étuve à 105 °C jusqu'à poids constant, par le rapport de la masse (M) et du volume total (V) de l'échantillon.



(a)



(b)



(c)

**Photo 2. Ct-mètre (a), sonde pour la mesure de la conductivité thermique (b), sonde pour la mesure de la chaleur spécifique (c)**

$$\rho = \frac{M}{V} \quad [3]$$

Le dispositif mis en place, a permis de suivre l'évolution du couple température-humidité relative sur six (06) mois (20 Août 2010 à Janvier 2011). Les paramètres du climatiques ont été obtenus à l'aide d'une mini station météo (Ph.3). La mesure du rayonnement solaire global reçu, est réalisée à l'aide de deux pyranomètres (Ph.4), de



**Photo 3. Mini station météo**



**Photo 4. Pyranomètre**

type Kipp et Zonen (Sensibilité 18,61 10-6 v/w.m<sup>2</sup>), (Kaled, 2008).

Pour la mesure des températures ambiante et de surface, des thermocouples de type K (chromel-alumel) ont été fixés en affleurement sur les parois des bâtisses. La chaîne de mesure comprend des capteurs de type K (précision 0,75% / °C), des fils de liaison et un indicateur numérique (Agilent 34970A, résolution 6 ½ digits). Pour l'humidité relative, un enregistreur équipé d'un faisceau à cheveu (série 165-00, précision ± 6%) a été utilisé.

Les mesures suivantes ont été effectuées : la température et l'humidité relative de l'air extérieur, le rayonnement solaire global reçu, la température et l'humidité relative de l'air intérieur et la température sur les parois interne et externe des murs (température de surface).

Pour rappel, les deux bâtisses instrumentées sont inhabitées et à conditions climatiques maîtrisées et subies (ni chauffage ni rafraîchissement).

## 5. TRAITEMENT DES DONNÉES BRUTES ET MÉTHODE D'ANALYSE

En considérant les données enregistrées conformes aux saisons conventionnelles en Algérie, il a été procédé à l'élimination de toutes les mesures jugées anormales (températures basses l'été ou élevées l'hiver). L'analyse, s'est d'abord basée sur un examen journalier (sur 24h), puis complétée par une analyse en série temporelle.

## 6. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 6.1. Caractéristiques thermophysiques du bloc de terre comprimée

Les caractéristiques thermophysiques du BTC utilisé dans la construction des deux prototypes PB et PM sont consignées dans le Tableau 1.



**Tableau 1. Caractéristiques thermophysiques du BTC**

$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ exp (w/m.°C)	$\alpha$ exp. (m <sup>2</sup> /h)	$C_p$ exp. (w.h/kg.°C)
2000	1,10	$2 \cdot 10^{-3}$	23,60

## 6.2. Types de sollicitations thermiques retenues

Deux séquences aux conditions climatiques extrêmes ont été retenues dans cette étude : une journée représentative d'un été chaud et ensoleillé (29 août 2010), et une journée représentative d'un hiver froid et ensoleillé (27 janvier 2011). Les valeurs extrêmes des paramètres hygrothermiques relatives à ces deux séquences sont consignées dans le tableau 2.

Pour la température maximale interne, son examen (Tab.2) fait ressortir pour le prototype PB (resp. PM), une température maximale d'été nettement inférieure à celle de l'extérieur. Une baisse de 5,75°C (resp. 10,7°C) est relevée. En hiver, cette baisse est de 3,5°C (resp. 7°C).

Pour les températures minimales internes, le prototype PB (resp. PM) offre une température interne d'été supérieure à celle de l'extérieur. Un gain de 8,33°C (resp. 3,5°C) est observé. En hiver, le gain devient 6,5°C (resp. 2,6°C).

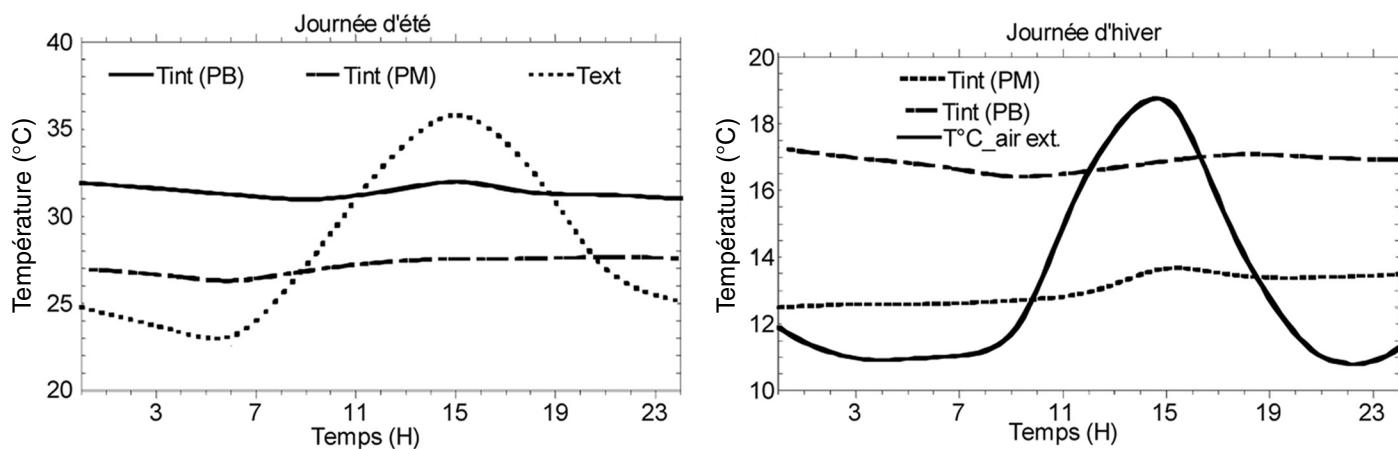
## 6.3. Comportement thermique des bâtisses

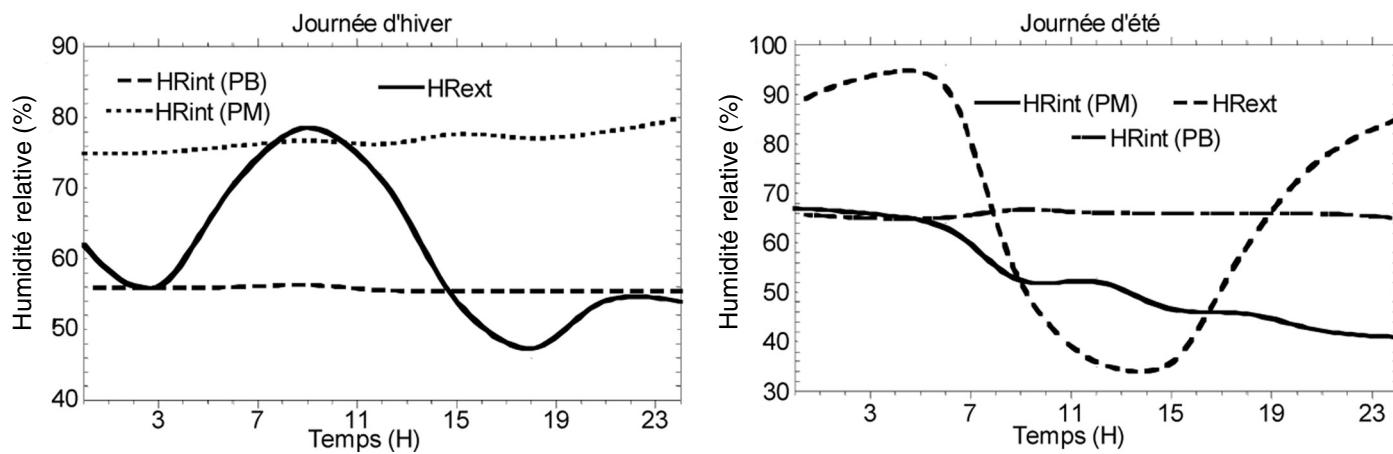
Les figures 3 et 4 présentent le profil des ambiances interne et externe pour les journées d'été et d'hiver. Leur examen sur les deux saisons, montre, des profils de température quotidienne très stables, reconnaissables par la très faible amplitude entre les températures maximales et minimales internes sur 24 h (écart-type très faible), contrairement à celui de l'air extérieur pour lequel, il est constaté des amplitudes fortes sur les deux saisons (15,8 °C en été et 11 °C en hiver).

Pour les humidités relatives, exception faite de l'humidité relative interne du PM qui suit une tendance de baisse en période d'été, le même constat est relevé, à savoir, la très grande stabilité de l'humidité relative interne (écart-type très faible) par rapport à celles de l'extérieur ; ce qui illustre la qualité régulatrice d'hygrométrie et tempérante du mur en bloc de terre comprimée.

**Tableau 2. Valeurs maximales et minimales des paramètres pour un jour d'été et d'hiver**

	T int (°C)		Text (°C)	HR int (%)		HR ext (%)	
	P B	PM		PB	PM		
Max	Eté	32,71	27,8	38,46	67	68	96,00
	Hiver	17,27	13,8	20,8	56,5	80	87
Min	Eté	30,92	26,1	22,59	64	41	30
	Hiver	16,37	12,5	9,9	55,5	75	34

**Figure 3. Profil de la température extérieure (Text), interne prototype PB (Tint (B)) et interne prototype PM (Tint (M))**



**Figure 4. Profil de l'humidité relative extérieure ( $HR_{ext}$ ), interne prototype PB ( $HR_{int}(PB)$ ) et interne prototype PM ( $HR_{int}(PM)$ )**

L'isolation thermique complète du prototype PM a conduit à des conditions confortables l'été. Pour le prototype PB, nonobstant des températures nocturnes internes supérieures à celles de l'air extérieur, une ventilation naturelle nocturne (indispensable dans le cas étudié) permettra d'atténuer cette surchauffe interne.

La Figure 5 ci-après, donne l'évolution synchrone des températures relevées au cours de la journée type d'été, sur les faces externes des murs des deux prototypes. Son examen fait ressortir des valeurs de température qui sont plus élevées sur le prototype PM que sur le prototype PB. A noter aussi, l'échauffement rapide et tôt le matin de ces murs, ce qui laisse penser que durant la nuit et très tôt matin, la chaleur freinée par l'isolant, et restée confinée dans le mur, se serait restituée vers l'extérieur par conduction. En diurne, la surface se réchaufferait simultanément par rayonnement solaire et par conduction.

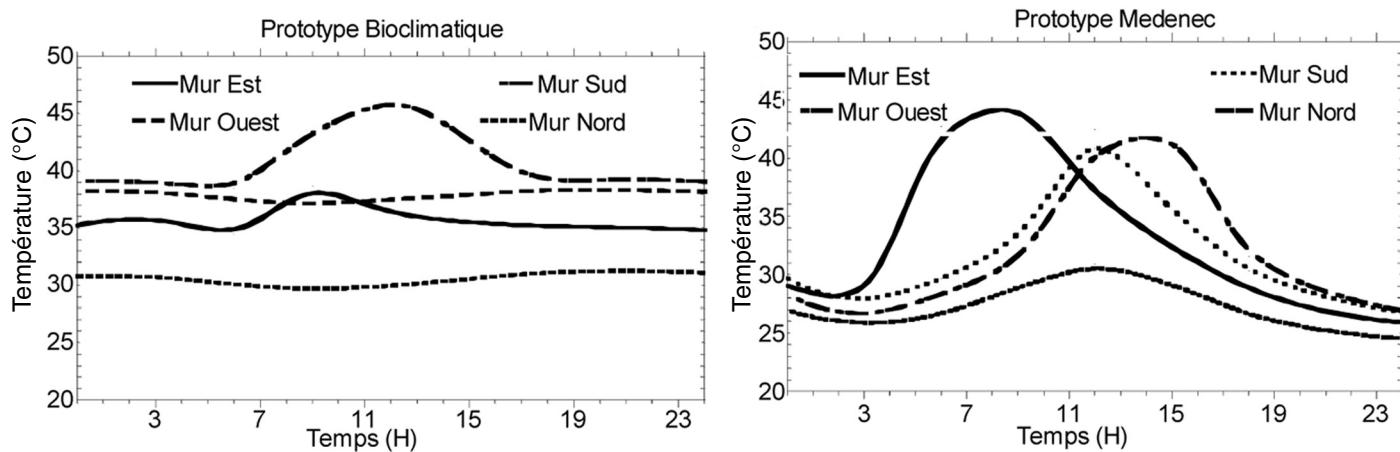
Pour le prototype PB, il est patent que ces échanges sont régis, pendant la journée, par le rayonnement solaire, alors qu'en nocturne ils sont gouvernés par la convection naturelle. Aussi, les parties soumises à un fort rayonnement le matin se refroidissent très rapidement à sa disparition.

La Figure 6 ci-après, donne l'évolution synchrone des températures relevées au cours de la journée type d'hiver, sur les faces internes des murs des deux prototypes.

Son examen fait clairement ressortir sur le prototype PM, l'effet freinant des apports solaires gratuits le jour. Il est enregistré une température inférieure de 5°C en moyenne par rapport à la température interne du prototype PB. Ce dernier, semble mieux remplir les conditions passives pour ses besoins de chauffage. Contrairement au prototype PM, il ne nécessite qu'un chauffage d'appoint l'hiver pour le confort d'hiver (en Algérie, la température de consigne d'hiver est de 19°C), (CNERIB, 2000). Quant au prototype PM, un chauffage écologique et à faible impact sur l'environnement rendrait intéressante cette solution.

Par ailleurs, l'examen des profils (fig.5 et 6) montre qu'à l'inverse du mur orienté Nord, les murs orientés Est, Ouest et Sud minimiseraient (resp. augmenteraient) les besoins de chauffage (resp. de rafraîchissement).

La Figure 7 présente l'évolution synchrone de la température extérieure et celle de la surface interne du mur orienté Sud de chaque prototype. Son examen révèle que durant les journées d'été, le mur du prototype PB a conduit à un bon amortissement du pic de chaleur de l'ordre de 4,5°C et décalé de 05 heures. Autrement dit, le mur homogène en BTC a permis, grâce à sa capacité thermique assez importante, de stocker la chaleur extérieure pendant la journée en l'amortissant de 4,5°C et de la restituer grâce à une valeur de diffusivité thermique relativement faible, 05 h plus tard,



**Figure 5. Profil des températures (faces externes des murs ; journée type d'été)**

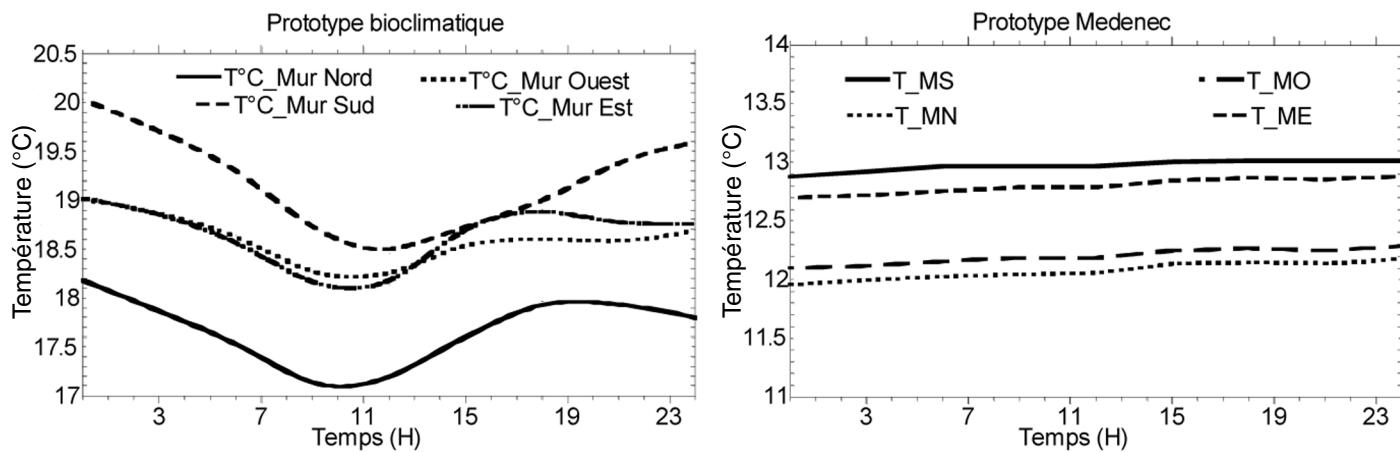


Figure 6. Profil des températures (faces internes des murs ; journée type d'hiver)

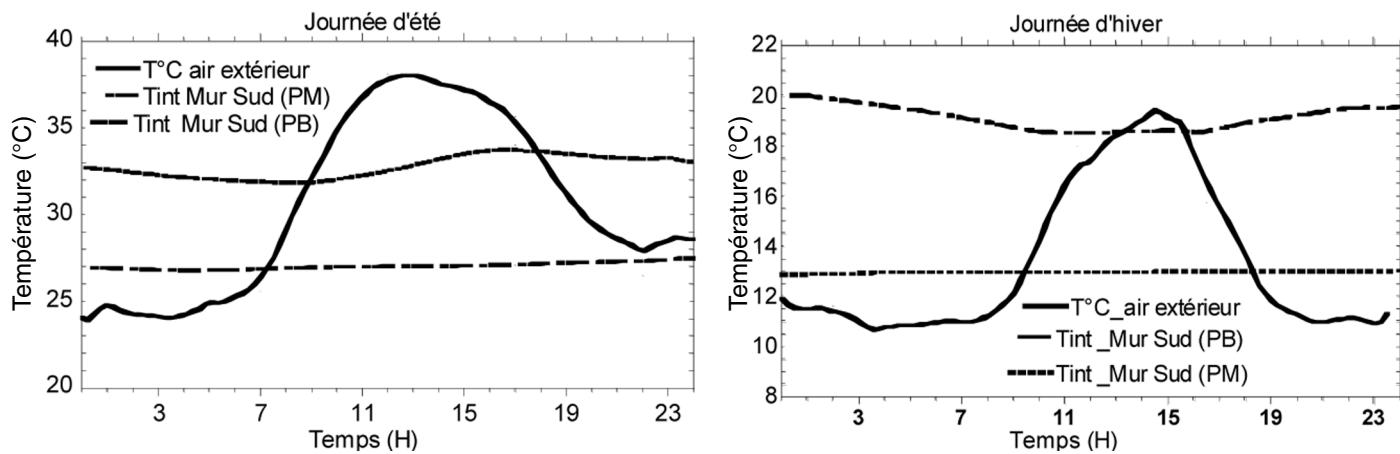


Figure 7. Profil de la température extérieure et de la température de la surface interne du mur orienté Sud du prototype PB (resp. PM) (journées d'été et d'hiver)

soit lorsque la température extérieure commence à baisser. Par contre sur le prototype PM, il est relevé, un amortissement constant appréciable (avec absence de pic) de 11°C les journées d'été et une amplification faible constante de l'ordre de 2°C seulement les nuits d'hiver. Les figurent 8 et 9 présentent respectivement les effets sur le prototype PB du brise-soleil et de l'écran végétal ainsi que l'effet de l'isolation de la toiture.

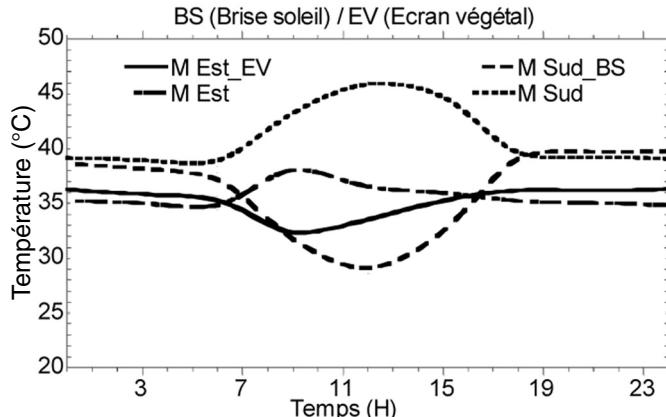


Figure 8. Effet d'un brise-soleil et d'un écran végétal

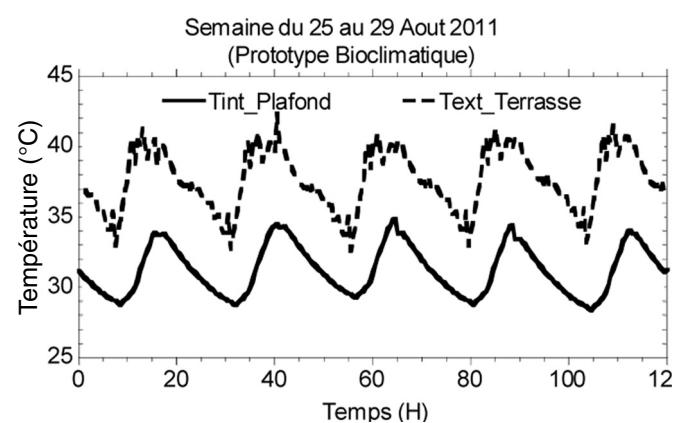


Figure 9. Effet de l'inertie de la toiture

Les effets bénéfiques de ces quelques dispositions introduites sur l'abaissement des températures sont bien confirmés. De plus, les résultats de la figure 9 suggèrent une similarité de comportement entre la température de la toiture et celle du plafond. Sur cet aspect des effets, il serait intéressant d'examiner si, une conception orientée hiver pour le prototype PB n'aurait pas comme corolaires sur-chauffe et inconfort l'été.

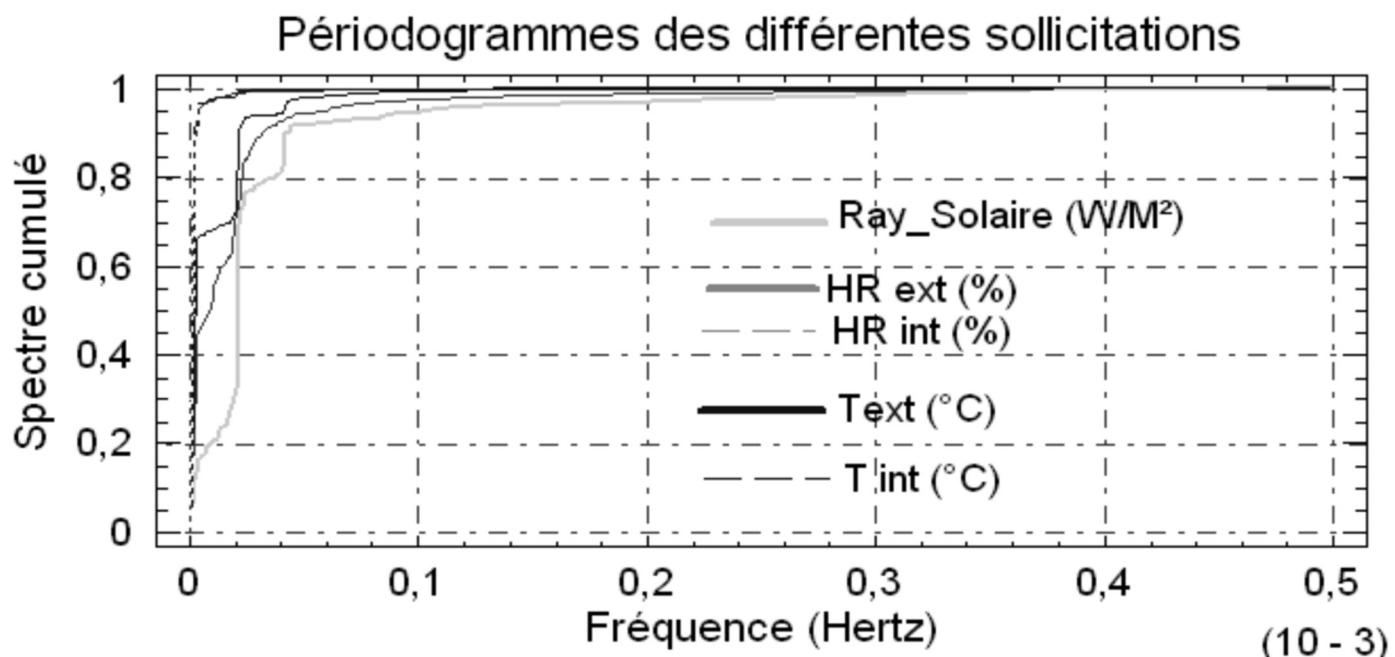


Figure 10. Spectres cumulés de puissance des sollicitations

Enfin, la figure 10 illustre les périodogrammes déduits à partir d'une analyse en série temporelle des différentes sollicitations. Les spectres de puissance révèlent que la paroi en BTC est soumise à une sollicitation de type basse fréquence. Hormis pour le rayonnement solaire, environ 85% de l'information dynamique (variance) des autres sollicitations, se concentre sur des fréquences inférieures à  $0,02 \times 10^{-3}$  Hertz, soit une période d'environ 14h. La température et l'humidité de l'air habité sont plus stables que ceux de l'air extérieur et l'éclairement solaire paraît comme étant le signal le plus riche en fréquences. Toutes les sollicitations ont une composante périodique marquée sur une journée.

## 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail est de valoriser et quantifier les performances thermiques en saison estivale et hivernale de deux bâtisses. De cette investigation in-situ, il ressort le caractère *respirant* et *amortissant* du matériau terre. L'analyse de la sollicitation thermique en série temporelle a révélé une composante périodique marquée sur une journée pour une paroi homogène en BTC et que, par ailleurs l'épaisseur choisie semble satisfaisante pour traiter les problèmes de l'inertie thermique de l'ordre d'une journée. Le prototype réalisé en mur homogène semble mieux remplir les conditions d'un fonctionnement passif, et donc bien adapté à notre climat. Certes, si une isolation totale est intéressante en été, par contre en hiver, elle freine considérablement les apports solaires gratuits du jour. Sur cet aspect, le rôle de l'isolant reste ambigu pour le contexte étudié car 1- seul un chauffage écologique et à faible impact sur l'environnement rendrait intéressante cette solution, 2- il risque de freiner l'évacuation de l'excès de chaleur la nuit et enfin, 3- la question pertinente à ne pas éluder est de savoir s'il est nécessaire, pour notre climat, de

procéder à une isolation complète de la bâtie. Sur un autre plan, selon que la bâtie est isolée ou non, cette étude a mis également en évidence une variabilité dans les modes de transfert de chaleur intervenant lors des échanges diurne et nocturne.

Comme perspective, l'estimation de la performance énergétique de ce type de construction est d'un intérêt avéré.

## 8. RÉFÉRENCES

- Benhabib R., Aït Mokhtar A., et ALLARD F., Analyse bioclimatique de l'habitat traditionnel des régions désertiques Nord sahariennes, LEPTAB, Dpt G.C et Mécanique, Université de la Rochelle, Paris, France, 1994
- CNERIB, *Réglementation thermique d'hiver*, Document technique réglementaire, Edition CNERIB, Algérie, 2000
- Houben H., « Pour une architecture nouvelle », *Écodéci-sion*, Autonome, 1997
- Kaled A., Dispositif d'étalonnage du pyromètre, rapport de stage, Laboratoire d'Energétique, d'Electronique et Procédés, Université de la Réunion, 2008
- Marmoret L., Exemple de suivi thermique d'une maison expérimentale en bauge mécanisée, Laboratoire des technologies innovantes, Université Jules Verne de Picardie, Amiens, France, 2004
- NF EN 993-15, *Ct-mètre : Appareillage pour la mesure de la conductivité et de la chaleur spécifique*, CSTB Grenoble, 2005
- Senicat C.A., « l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel : une analyse des politiques des pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée », *Idées pour le débat sur le changement climatique*, n°14, pp.1-67, 2008
- Wyss U et SAURET H., Indicateurs de confort dans la technique de la voûte nubienne, Rapport intermédiaire, 2007