



## Etude du comportement thermique des maisons ksouriennes en terre crue sur les ambiances intérieures . Cas d'étude : Ksar Z'gueg El Hadjadj - Laghout-

Redouane MOULAY

Adresse : Cité 1er Novembre 03000 . Laghouat  
*Email: redouanereda26@yahoo.fr*



### Résumé :

Le climat peut constituer un facteur déterminant dans l'architecture lorsqu'il est à contrainte unique. Par contre, s'il est à caractéristiques conflictuelles, il faut chercher un compromis selon les facteurs climatiques dominants du lieu. Une investigation a été menée sur terrain (relevé des températures, humidité relative, vitesse et direction du vent) d'une maison ksourienne en terre crue à Laghouat, afin d'estimer le rôle de l'inertie thermique du matériau local "Toub" sur le confort thermique sous un climat présaharien très chaud en été, froid et rigoureux avec une faible pluviométrie en hiver. Les résultats montrent que l'utilisation d'un matériau local "Toub" adapté au climat de la région est à l'origine de la réalisation du confort thermique et la consommation réduite de l'énergie.

A ce titre, la validation des résultats de l'investigation par le logiciel ENERGY PLUS (version 8.0.0) permet d'une part, de vérifier les résultats obtenus par la campagne de mesure in situ et d'autre part, de valoriser l'inertie thermique d'un matériau local "Toub", qui fait participer le bâtiment à une conception plus performante thermiquement et plus économe énergétiquement, et ce dans le maintien de l'équilibre thermique intérieur durable pour les situations les plus défavorables.

### Mots clés :

Architecture en terre ; Matériaux locaux ; Confort thermique ; Inertie thermique ; Economie d'énergie.

### Introduction

Selon les pays, le secteur du BTP est très énergivore et représente entre 30 % et 40 % de la consommation d'énergie totale, [1]. L'efficacité énergétique des bâtiments est une préoccupation importante de notre société, dans la mesure où elle permet l'amélioration des conditions de confort et la réduction des charges liées à la climatisation et le chauffage par des moyens écologiques à faible coût énergétique, sont considérées aujourd'hui comme une priorité absolue. La recherche de l'utilisation des matériaux locaux et sa généralisation avec l'introduction des énergies renouvelables, pourrait apporter des solutions viables aux plus déshérités si une forte coopération internationale se mobilisait.

Les tentatives des concepteurs pour créer des ambiances intérieures confortables dans cette optique, se matérialisent par l'apparition de nouveaux vocabulaires et concepts. Changés au gré de modes : l'architecture climatique, solaire, bioclimatique, etc, reposent tous en réalité sur la réappropriation de principes anciens délaissés au nom de la technologie [2].

Dans cet recherche, Il sera mis en exergue les qualités, tant thermiques qu'environnementales du matériau terre crue, un matériau aujourd'hui délaissé, abandonné, méprisé, marginalisé. et justifier ses qualités par une méthode scientifique expérimentale basée sur des essais in situ et une conception architecturale harmonieuse et soucieuse de la problématique du confort thermique dans un climat chaud et aride. Alors, il est important de penser à la problématique énergétique, au confort des occupants et à la préservation de l'environnement. Dans ce contexte, la question reste posée de savoir : **Est ce que les maisons ksouriennes en terre crue réalisent des conditions de confort acceptable l'essentiel de l'année, durant les périodes estivale et hivernale?**

## 1. Méthodologie de recherche

Notre recherche reposera sur la méthode P.O.E « l'évaluation post-occupationnelle », elle vise à savoir si l'espace répond correctement aux exigences de son fonctionnement et de ses usagers. Le P.O.E est une méthode qui permet d'évaluer les performances d'un bâtiment après son occupation par les usagers, elle permet ainsi de dégager toute les carences et imperfections liées à son fonctionnement .

Cette méthode d'évaluation post-occupationnelle" consistera en une campagne de mesures -in situ- visant à déterminer l'humidité relative et les températures d'air intérieures et extérieures d'une maison ksourienne aux différentes heures de la journée et à différentes périodes de l'année , grâce à un hygromètre et un thermomètre avec une prise de photos simultanée. Ces données seront en même temps complétées par d'autres informations qui seront recueillies auprès de la communauté ksourienne par le biais de différents entretiens (questionnaire). Les résultats de la simulation thermique viendront compléter ceux de la campagne de mesures . Après analyse et interprétation de ces données, il sera possible de cerner les performances thermiques des maisons ksouriennes par rapport aux besoins et exigences du confort thermique des occupants .

## 2. Présentation du cas d'étude

Laghouat se situe au cœur du pays à 400 km au sud de la capitale Alger, la wilaya s'étend sur une superficie de 25 000 km<sup>2</sup>

La ville de Laghouat est située au piémont de l'Atlas saharien du côté nord, elle s'étend sur le plateau saharien du côté sud ; Laghouat est dirigée entre 830m d'altitude à l'ouest et 790m d'altitude au Nord séparée par une profonde échancre. Elle a une latitude de 33°46° et une longitude de 2°56° (fig. 01) .

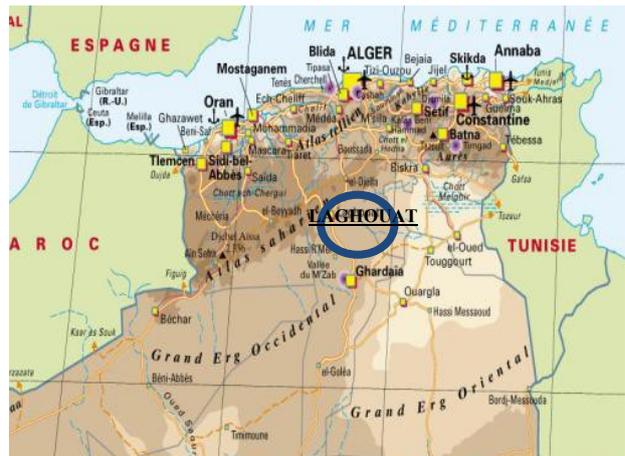


Figure 1 : situation de la ville de Laghouat sur la carte géographique (Source: : ENCARTA, 2007)

## 3. Analyse climatique de la ville de Laghouat

Afin de mieux caractériser le climat de la ville de Laghouat , il est utile d'analyser les différents paramètres qui le constituent, en interprétant les données météorologiques qui s'étalent sur une période de dix ans, relatives à la période (2004-2013).

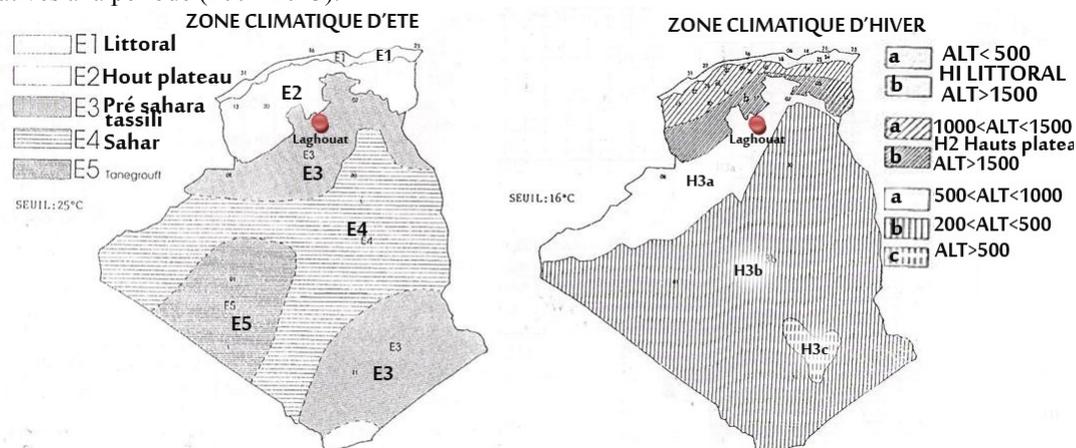


Figure 2 : situation de la ville de Laghouat sur la carte géographique (Source: : ENCARTA, 2007)

D'après le zonage de la figure 2 , la ville de Laghouat fait partie de la zone climatique E3 (zone d'été) et H3a (zone d'hiver) déterminée par deux saisons principales :

- Un été très chaud et sec mais moins pénibles qu'en zone E4.
- Un hiver très froid la nuit par rapport au jour. Les écarts de température entre le jour et la nuit sont importants [3] .

## 4. Investigation

### 4.1. Analyse de l'échantillon

L'investigation a été menée sur une maison qui s'insère dans un noyau historique dense (ksar ), implanté sur la colline Tizigrarine au côté Nord -Est de la ville. Elle est en R+1, construite en terre crue -Toub-, dont l'épaisseur de la paroi extérieure est de 50 cm .Les façades sont aveugles et toute les pièces sont aérées et éclairées par le Haouche ( introvertie) "Naturellement la pénétration d'air, de lumière et d'ensoleillement se fait à travers les cours intérieures considérées comme régulateur thermique". [4] [5] [6]



Figure 3 : Situation du cas d'étude par rapport au Ksar de la ville de Laghouat (Source: auteur )

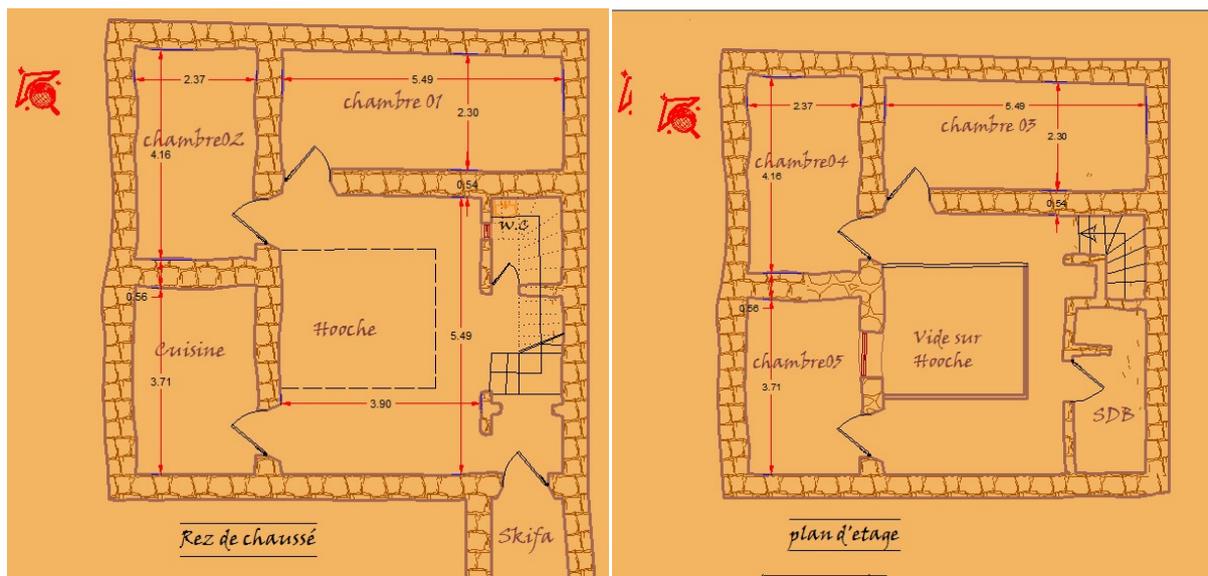


Figure 4 : Situation du cas d'étude par rapport au Ksar de la ville de Laghouat (Source: auteur )

### 4.2. Principes de l'architecture bioclimatique appliquée au ksar de la ville de Laghouat

Les ksours ont été développés en réaction des besoins culturels et climatiques de leurs habitants [7].

- La Végétation pourrait jouer un rôle important dans l'amélioration du microclimat urbain qui doit être utilisé judicieusement dans la planification urbaine et la conception des espaces extérieurs .

- Le rapport plein-vidé du ksar montre une dominance absolue du plein qui est constitué de divers îlots de logements bâtis
- Les maisons traditionnelles s'assemblent dans le ksar en groupes; elles se soutiennent mutuellement par adossement les unes aux autres et, parfois elles sont séparées par une rue ou une impasse.
- Les façades extérieures des maisons traditionnelles sont généralement aveugles, nues et sobres
- Tous les espaces de la maison s'organisent autour d'une cour centrale -patio -
- construction avec des matériaux locaux (la terre) qui a une bonne qualité hygroscopique, elle absorbe la moindre humidité dans les constructions, d'où une augmentation du taux d'évaporation de l'air, donc une isolation thermique meilleure : les bâtiments conservent la fraîcheur en été et la chaleur en hiver contrairement au béton .

#### 4.3. Les caractéristiques thermiques des matériaux de construction " Toub"

Adobe " Toub" c'est une technique de construction en terre crue qui consiste à produire des briques de terre façonnées à la main ou moulées puis séchées au soleil , ces briques sont ensuite appareillées en mur épais qui on l'avantage d'être porteurs .

La terre crue possède une excellente inertie thermique ; Les caractéristiques thermo-physiques de l'adobe sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Les propriétés thermo-physiques de l'adobe ( Toub)

(source : [http://www.argileo.fr/btc\\_qualite\\_de\\_vie.html](http://www.argileo.fr/btc_qualite_de_vie.html))

Matériaux locaux	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité $\lambda$ (en W/m.°C)	Capacité thermique (kJ/m <sup>3</sup> .°C)	Diffusivité ( $\times 10^{-7}$ m <sup>2</sup> /s)	K	Impact sanitaire	Impact écologique
Terre crue	1500 à 1800	0,21 à 1,1	1350 à 1512	7,3	1290	😊	😊

impact sanitaire du produit : estimation à partir des dégagement de substances nocives en cours d'utilisation, la faible capacité de respiration.

impact écologique du produit : estimation à partir de l'énergie grise (extraction, production, transport), le potentiel de recyclage et le caractère renouvelable de la matière première.

## 5. Diagnostic énergétique du cas d'études

### 5.1. Description du système de mesure

L'acquisition des données a été réalisée avec utilisation d'un certain nombre de matériel. La campagne de mesure est menée avec plusieurs appareils : thermomètre digital avec un anémomètre pour les mesures du vent ,du modèle: TESTO 615 et un hygromètre digital du modèle: TESTO 415. De ce fait, un étalonnage de précision est envisagé entre ces différents instruments, pour éviter le décalage qui peut se présenter entre les valeurs enregistrées, et par la suite, de les prendre en considération plus tard dans les valeurs des résultats .

### 5.2. Déroulement et mesures : Méthode de calcul point à point

Les mesures ont été effectuées durant deux périodes retenues pour l'investigation, estivale et hivernale. Donc , les relevés de température et d'humidité se sont déroulés pendant des mois parmi les plus critiques de chaque période. Le mois de juin en été et le mois de décembre en hiver, pour une durée de quatre jours successifs chacun : (juin 2013, décembre 2013).

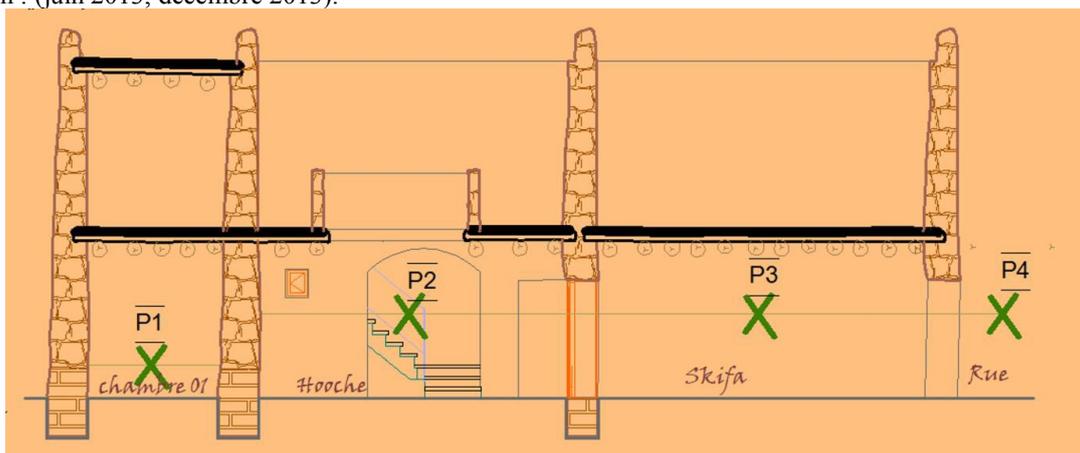


Figure 5 : Points de prise de température et d'humidité dans les pièces testées sur le plan altimétrique (Source: Auteur)

Durant les jours d'investigation les mesures des différents paramètres ont été prises en quatre points . Ces points représentent le centre de la chambre 01 testée (point1) à une hauteur de 0.6 m (niveau de lit) (Fig 5), et de la même hauteur de 1.50m au centre du patio ,la Skifa et la rue (points 2 , 3 et 4). Les occupants sont tous des adultes, donc il n'y avait pas de risque objectif d'éventuelles manipulations qui puissent fausser les lectures.

### 5.3. Interprétation des résultats

#### 5.3.1. Les températures intérieures et la zone de confort (21 Juin 2013)

La figure 6 ci-après montre les températures mesurées dans les différents espaces de la maison ksourienne . Pour cela, les températures mesurées dans ce cas seront situées dans une zone de confort établie d'après la température neutre de Humphrey lors de l'analyse bioclimatique de la ville de Laghouat. Cette zone est comprise entre la limite supérieure de 31.11°C et la limite inférieure de 27.11°C pour la période estivale (Annexes 01) .

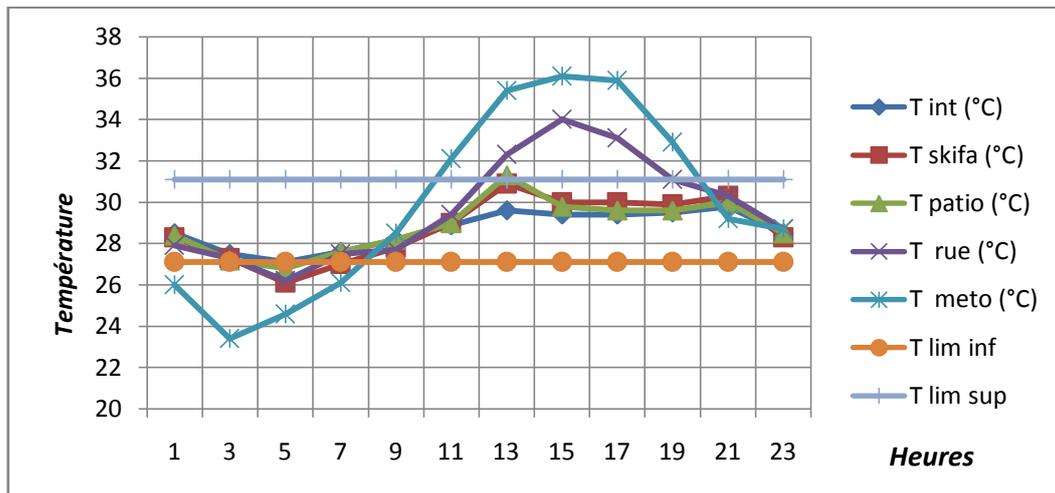


Figure 6 : Comparaison des températures moyennes intérieures de la maison ksourienne avec les limites de confort - période estivale- (Source: Auteur)

Nous constatons que l'investigation sur la situation thermique dans l'habitat ksourienne montre , que les valeurs des températures intérieures (de la chambre 01, skifa et patio) sont généralement plus proches de la limite supérieure de la zone de confort déjà déduite pour le mois de juin (mois de la campagne de mesure) avec un écart maximal de 2,11°C à 14 h00, tout en étant inférieures à la température extérieure de la station météo enregistrée à la même heure (de 9h00 à 21h00), En d'autre terme, la maison bénéficie des ombres portées par les masques urbains que représentent les maisons voisines, ainsi le patio offrant un masque solaire efficace du point de vue thermique(zone tampon) . Par conséquent, nous pouvons déduire que l'espace le plus confortable reste celui de la chambre 01 , car c'est à l'intérieur de cette dernière que sont enregistrés les meilleurs résultats.

#### 5.3.2. Les températures intérieures et la zone de confort ( 21 Décembre 2013)

L'investigation sur la situation thermique dans l'habitat ksourienne ,montre que les températures mesurées dans la chambre et du patio se situent généralement dans les limites de confort thermique déterminées pour Décembre (mois de la campagne). Mais, les températures intérieures sont en-deca des limites du confort inférieur en décembre entre 10h et 18h, (Fig. 7) justifiées en grande partie par les activités et tâches ménagers ( l'ouverture de la fenêtre pour la ventilation matinale) . Toutefois , on peut estimer que pendant la journée 70% des maisons ksouriennes en terre crue en une qualité thermique confortable en hiver . Sachant que les profils des températures de l'air enregistrées à l'intérieur du patio retracent les mêmes allures avec celles des températures enregistrées dans la chambre 01, suivant ainsi le parcours d'évolution des gains solaires durant la journée, période où l'espace patio reçoit le maximum de radiations solaires , étant couvert durant la période hivernale avec une toiture en polyane (installée temporairement par le propriétaire) ce qui élimine l'effet de cheminée et renforce le gain d'énergie (effet de serre) . Bien que les températures mesurées dans la ruelle et la Skifa soient en dehors des limites du confort thermique, on peut considérer que ces deux espaces jouent un rôle de tampon entre l'extérieur et l'intérieur

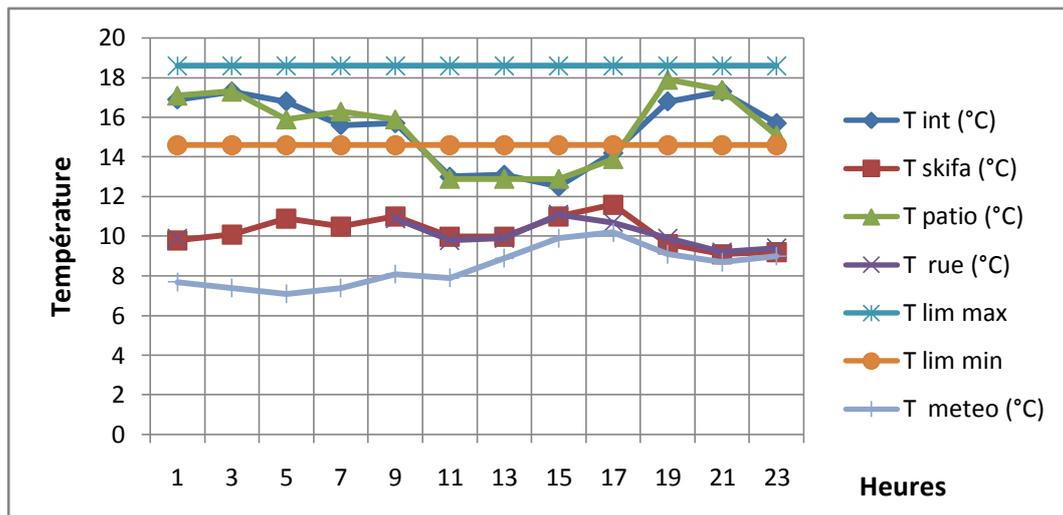


Figure 7 : Comparaison des températures moyennes intérieures de la maison ksourienne avec les limites de confort -période hivernale- (Source: Auteur)

## 6. Simulation numérique du cas choisi par ENERGYPLUS

A partir des données architecturales et des propriétés thermo physiques du matériau, une analyse du comportement thermique des échantillons est effectuée à l'aide du logiciel «EnergyPlus version 8.0.0»

La structure globale du travail de simulation est basée sur les étapes suivantes :

- La première étape : concerne l'introduction des données climatiques de la région de Laghouat (33°46') ; les valeurs horaires des températures et des humidités relatives pour les périodes d'été et d'hiver . Ensuite la description détaillée de la maison et son environnement immédiat ainsi que les scénarios d'appropriation de l'espace .
- La deuxième étape porte sur le traitement des données après programmation.
- La troisième et dernière étape ,c'est la lecture des résultats de la simulation par le biais du logiciel Excel.

### 6.1. Description de la cellule simulée

La cellule étudiée représente une structure mono zone (chambre 1 au rez de chaussée ) de 20 m<sup>2</sup> de surface habitable et 3 m de hauteur, construite sur terre crue ; Les caractéristiques thermiques des parois de la cellule étudiée sont consignées sur le tableau 3 (Annexes 02) .

### 6.2. Période estivale: Comparaison entre les températures intérieures mesurées et celles simulées par EnergyPlus :

Afin de confronter les résultats des simulations aux résultats expérimentaux, les comparaisons portent sur les variations thermiques pendant les heures d'occupation aux niveaux de l'espace vécu (la chambre) .

La figure 8 montre une concordance entre la courbe des températures intérieures mesurées et celles simulées. Les résultats de la comparaison présentent une évolution similaire entre la courbe des températures d'air mesurées, et celle calculée par le programme « Energyplus », avec un écart maximal de 2,42°C enregistré à 21h00, alors qu'il est faible aux autres points. Cet écart peut être qualifié d'admissible. Ceci revient au comportement des usagers . La vitesse du vent dans la simulation est considérée constante pendant toute la journée, mais en réalité celle-ci est variable et parfois très variable entre le jour et la nuit, L'écart observé entre les deux courbes revient également à la température de l'air extérieure utilisée dans le calcul, qui est celle de la station météorologique locale ,le microclimat du site, a certainement ses particularités .

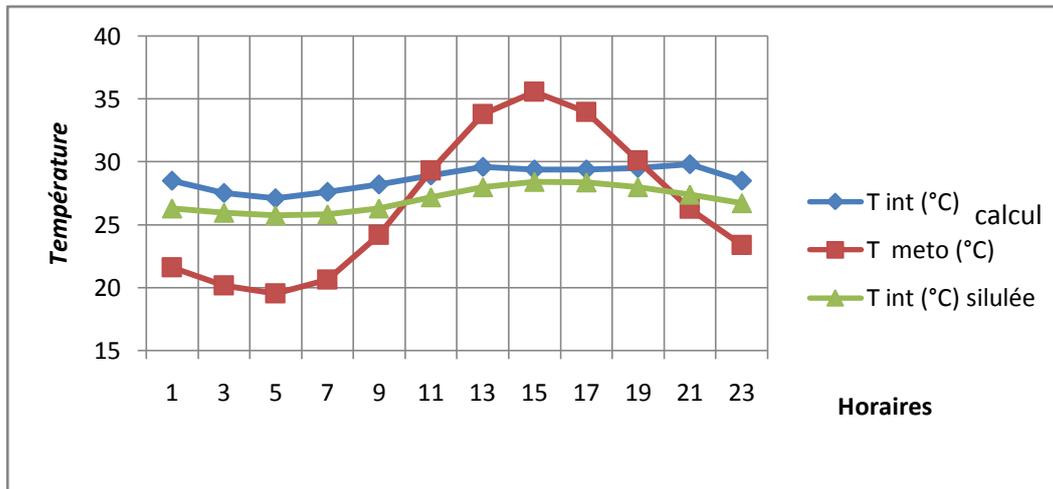


Figure 8. Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la maison ksourienne [Période estivale, journée du 21-06-2014]. (source : auteur )

### 6.3. Période hivernale: Comparaison entre les températures intérieures mesurées et celles simulées par EnergyPlus :

Les courbes de la figure 9 révèlent presque une convenance entre la température simulée et la température moyenne intérieure issue des séries de mesures dans la chambre objet de l'investigation . L'écart maximal entre les deux températures est de 3.15°C, enregistré à minuit. Ceci affirme l'efficacité et l'utilité des mesures in situ .

La température ambiante intérieure est surtout liée à la bonne qualité thermique du matériau utilisé . Donc on peut réaffirmer le rôle de l'inertie thermique dans le maintien de l'équilibre de l'ambiance thermique intérieur, rejoignant par ça plusieurs résultats de simulation .

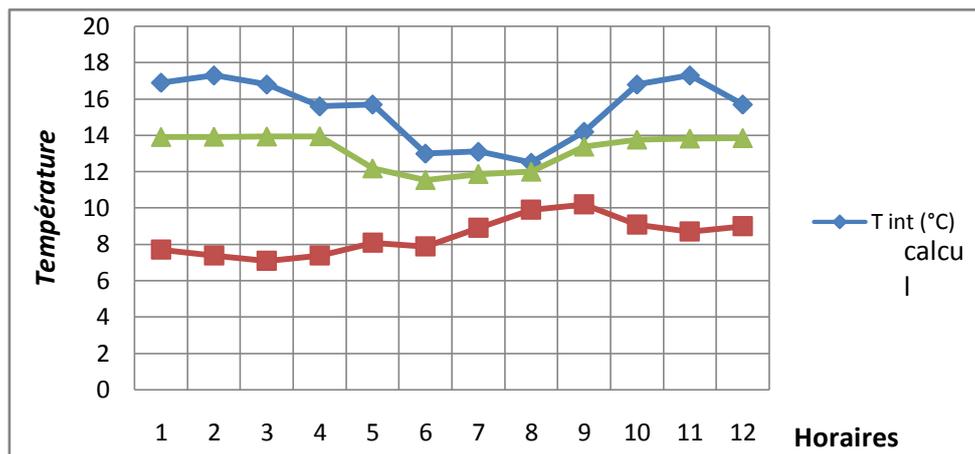


Figure 9. Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la maison ksourienne [Période hivernale , journée du 21-12-2013]. (source : auteur)

## Conclusion

La validation des résultats de simulation avec des données expérimentales démontre une corrélation dans tous les cas avec une erreur de  $\pm 5\%$  , donc on peut dire que ces résultats valident l'interprétation des mesures enregistrées sur le terrain , puisque l'écart ne dépasse pas les 3.25%. En plus , les résultats montrent une amélioration de la performance de la paroi dans le maintien de l'équilibre thermique , alors ces résultats valident aussi le rôle de l'inertie thermique dans le confort intérieur , d'une part, avec le maintien de la stabilité des températures internes et d'autre part , par l'équilibre thermique de l'air ambiant dans la pièce testée (chambre vécu) .

Alors en été comme en hiver, la simulation valide les résultats de l'investigation sur le rôle de l'inertie thermique dans l'assurance du confort thermique. Soutenant encore par ça l'avis de plusieurs chercheurs comme celui (d'Izard , 1993) sur le rôle de la forte inertie .

Finalement, les résultats présentés répondent à l'objectif principal de cette recherche et sont appuyés par une investigation in situ renforcée par une modélisation numérique mentionnée précédemment .

## Nomenclature

Symbole	Nom, <i>unité</i>
T <sub>int</sub>	Température de l'air à l'intérieur d'une chambre , °C
T <sub>skifa</sub>	Température de l'air dans Skifa , °C
T <sub>patio</sub>	Température de l'air dans le patio , °C
T <sub>rue</sub>	Température de l'air dans la rue , °C
T <sub>lim sup</sub>	Température de la limite supérieure de la zone de confort , °C
T <sub>lim inf</sub>	Température de la limite inférieure de la zone de confort, °C

## Références

- [1] A .MOKHTARI, K .BRAHIMI et R .BENZIADA , Architecture et Confort Thermique dans les Zones Arides, Application au Cas de la Ville de Béchar, *Revue des Energies Renouvelables*, Volume 11, N°2, Pages 307 – 315, 2008.
- [2] S .ABDOU, Investigation sur l'intégration climatique dans la maison traditionnelle du ksar de Ouargla, *Revue science & technologie, revue semestrielle de l'université Mentouri Constantine*. N°21 , 2004.
- [3] MINISTERE DE L'HABITAT , Recommandations Architecturales , ENAG éditions, Alger , 9 p ,1993.
- [4] A. RAVERAU , La Casbah d'Alger et le site créa la ville , éd. Suidabad , Paris , 282p, 1989 .
- [5] A. REMOND ,Grandes villes arabes à l'époque ottomane, éd. Suidabad A, Paris , 308-311 p , 1985.
- [6] J. L.IZARD et A. GUYOT ,Archi bio , ed. Parentheses, Roquevane. 101 p, 1980 .
- [7] A.BENNADJI, Adaptation climatique ou culturelle en zones arides, cas du sud est algérien, thèse de doctorat, Université Aix Marseille 1, 54 p,1999 .

## Annexes 01

Tableau 2 : Données météorologiques de la ville de Lagouat pour la période de 2004-2013

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Tmoy min	1,58	3,11	6,41	9,91	14,79	19,52	23,79	23,04	18,09	12,86	6,13	2,90
T moy max	14,76	15,92	20,53	24,48	29,36	35,56	39,67	38,84	32,01	26,38	19,10	14,87
T moy	7,89	9,47	13,58	17,00	22,31	27,10	32,23	30,00	24,94	19,40	12,38	8,66
Hr moy	58,56	52,44	40,22	41,22	36,22	34,00	25,56	27,67	41,67	51,00	57,22	60,22
Précipitations moy (mm)	5,57	6,73	14,98	16,46	11,49	10,31	6,36	11,74	26,55	26,34	9,57	7,32
Vent moy	2,87	3,74	4,02	4,53	4,11	3,81	3,38	3,21	2,99	2,52	2,71	5,50
Insolation moy (h)	247	195	263	213	315	338	360	385	99	119	176	152

### Calcul de la température neutre T<sub>n</sub> d'après la formule de Humphrey:

En raison des études sur le terrain, il a été proposé que la température de confort soit une fonction de la température extérieure, et peut être prévu par des équations de la forme suivante (Humphreys 1978, Auliciens et De Dear 1986, Nicol et Raja, 1995) :

$$T_{comf} = a \cdot T_{a-out} + b \dots \dots \dots (1)$$

Où T<sub>a,out</sub> est la température d'air extérieure moyenne.

Ainsi, après De Dear et Brager, (2002), ont proposé l'expression suivante :

$$T_{\text{comf}} = 0.31 T_{\text{a-out}} + 17.8 \dots \dots \dots (2)$$

Tandis que Humphreys 1978, Humphreys et Nicol 2000 et Nicol 2002 ont proposé une expression presque similaire :

$$T_{\text{comf}} = 0.534 T_{\text{a-out}} + 11.9 \dots \dots \dots (3)$$

$T_{\text{a-out}}$ : la température extérieure moyenne du mois en question en °C.

Les températures limites de confort  $T_c$  :

$$T_c = T_n \pm 2 \text{ K.}$$

$$T_c = T_n + 2\text{K} = 28.6^\circ\text{C} \text{ c'est la limite supérieure du confort.}$$

$$T_c = T_n - 2\text{K} = 24.6^\circ\text{C} \text{ c'est la limite inférieure du confort.}$$

**1. Calcul de la température neutre  $T_n$  d'après la formule de Humphrey:**

$$T_n = 11.9 + 0.534 T_0$$

Où  $T_n$  : la température neutre en °C

$T_0$  : la température extérieure moyenne du mois en question en °C.

Pour le mois de juin  $T_0 = 32,23^\circ\text{C}$   **$T_n = 29,11^\circ\text{C}$**

Pour le mois de décembre  $T_0 = 8,66^\circ\text{C}$   **$T_n = 16,6^\circ\text{C}$**

**2. Les températures limites de confort  $T_c$  :**

➤ Pour le mois de juin :  $T_c = T_n \pm 2 \text{ K.}$

$$T_c = T_n + 2\text{K} = \mathbf{31,11^\circ\text{C}}$$
 c'est la limite supérieure du confort.

$$T_c = T_n - 2\text{K} = \mathbf{27,11^\circ\text{C}}$$
 c'est la limite inférieure du confort.

➤ Pour le mois de décembre :

$$\text{La limite supérieure du confort } T_c = T_n + 2\text{K} = \mathbf{18,6^\circ\text{C}}$$

$$\text{La limite inférieure du confort. } T_c = T_n - 2\text{K} = \mathbf{14,6^\circ}$$

**Annexes 02**

Tableau 2 : composition des éléments de construction utilisés

construction	composition	Epaisseur (mm)	Epaisseur totale (mm)
Mur extérieur	Mortier De Chaux (enduit extérieur)	40	580
	Bloc de Toub	500	
	Mortier en Terre (enduit intérieur)	40	
Mur intérieur	Mortier en Terre (enduit intérieur)	40	580
	Bloc de Toub	600	
	Mortier en Terre (enduit intérieur)	40	
Plateforme	Terre	600	775
	Hérisson	150	
	Mortier De Pose	10	
	Carrelage grés	15	

Plancher toit	Mortier De Chaux	40	240
	Terre	100	
	Tronc de palmier	100	
Plancher intermédiaire	Carrelage grés	15	735
	Mortier De Pose	10	
	Terre	600	
	Tronc de palmier	100	
Porte	bois	35	35
Cadres en bois	bois	13	13
Vitrage fenêtre	Vitrage simple	3	3

**25-27 Octobre 2017**  
**Monastir - Tunisie**