

# Bâtiments construits en adobe salin, durabilité centenaire et confort thermique dans un climat désertique

BASSOUD A.<sup>1</sup>, KHELAFI H.<sup>1</sup>, MOKHTARI A. M.<sup>2</sup>, BADA A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Ahmed Draïa Adrar, Laboratoire LDDI, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire des Matériaux, Sols et Thermique Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf Oran Algérie

## Résumé

L'adobe est un matériau à inertie thermique importante, mais il se caractérise par une faible résistance mécanique soit en compression ou en flexion. L'utilisation d'adobe salin confectionné à l'aide d'un sable salin dans les bâtiments traditionnels dans la zone saharienne de l'Algérie présente une meilleure protection de ces bâtiments vis-à-vis des intempéries et offre une bonne isolation thermique au bâtiment. Nos mesures expérimentales effectuées sur les bâtiments traditionnels existants montrent que l'ambiance intérieure est tempérée et la température intérieure est quasi constante variant entre 31 et 33 °C, alors que celle de l'extérieur dépasse les 50 °C, marquant ainsi un écart journalier d'environ 17 °C. Cela influe positivement sur le confort thermique des habitants. Ce matériau apporte, par conséquent, une solution idéale aux habitants du Sahara, et apporte du confort thermique à l'intérieur du bâtiment sans recours à la climatisation électrique.

**Mots clés : Adobe, Ksar, Salin, Température, Aride, Saharienne**

## I. INTRODUCTION

Les bâtiments en Adobe sont connus depuis des siècles, l'architecture traditionnelle dans les zones à climat chaud et sec a développé une connaissance empirique, particulièrement orientée vers la réalisation du confort par temps chaud [1, 2]. Dans presque tous les climats chauds et arides et tempérés, la terre a toujours été la plus répandue en terme de matériau de construction [3].

Ce type de bâtiment est considéré comme une solution fiable pour les zones sahariennes, et a un effet positif environnemental. Il est caractérisé par un matériau d'argile de bonnes propriétés thermiques. A. P. Olukoya Obafemi et al. ont présenté les impacts environnementaux de l'adobe comme matériau de construction. Ce matériau a un l'effet positif sur l'environnement, vis-à-vis de l'émission des gaz à effet de serre dans les bâtiments contemporains réalisés en matériaux de capacité thermique faible. Nous avons découvert que les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par les humains étaient des briques de terre moulées appelées adobe. Il s'agit d'un matériau de construction fabriqué à partir d'un mélange de sable, d'argile et d'eau jusqu'à ce qu'il atteigne un état pâteux semi-stable, puis formé dans des moules en bois ou à la main, et laissé à l'air libre sous le soleil pour sécher [1, 4-6].

Ce matériau a un impact environnemental favorable [3], il est économique [7], résiste au feu, absorbe les polluants et encourage l'auto-construction [1, 4-6]. Il est recyclable [8] et ne consomme pas d'énergie lors de sa fabrication [10].

A Adrar, une région située au Sud algérien, les anciens habitants se sont adaptés à l'environnement des maisons construites en adobe avec presque zéro consommation d'énergie, ces dernières sont appelées localement "ksour". Les ksour sont un groupe compacté contenant de nombreux éléments thermiques tels que le matériau adobe, de petites ouvertures [9], des façades ombrées, des caves, des halls centraux, des ouvertures en plancher...etc.

Devant l'absence d'études thermiques des bâtiments dans cette région, cela a conduit à l'utilisation généralisée de divers matériaux comme le parpaing, la brique crue, le bloc en béton...etc. Cette démarche s'avère totalement contraire au confort thermique et provoque une augmentation de la consommation d'électricité dans la région.

La consommation d'électricité dans le secteur du bâtiment est estimée entre 40 et 55% de celle totale du Sud algérien [9].

Dans la présente étude, nous essayons d'éclaircir la valeur thermique d'adobe dans les bâtiments anciens avec la possibilité de leur utilisation dans les nouveaux bâtiments comme couches isolante dans les murs et le plafond afin de réduire la forte consommation d'électricité et réduire les subventions de l'état.

## 1. Description du site

Dans les régions désertiques d'Algérie, et dans toute l'Afrique du Nord, les anciens complexes architecturaux sont connus sous le nom de Ksar (Ksour au pluriel) et constituent un tissu urbain compact. La région d'Adrar, au Sud d'Algérie, compte plus de 333 Ksars [1] de formes carrées et circulaires.

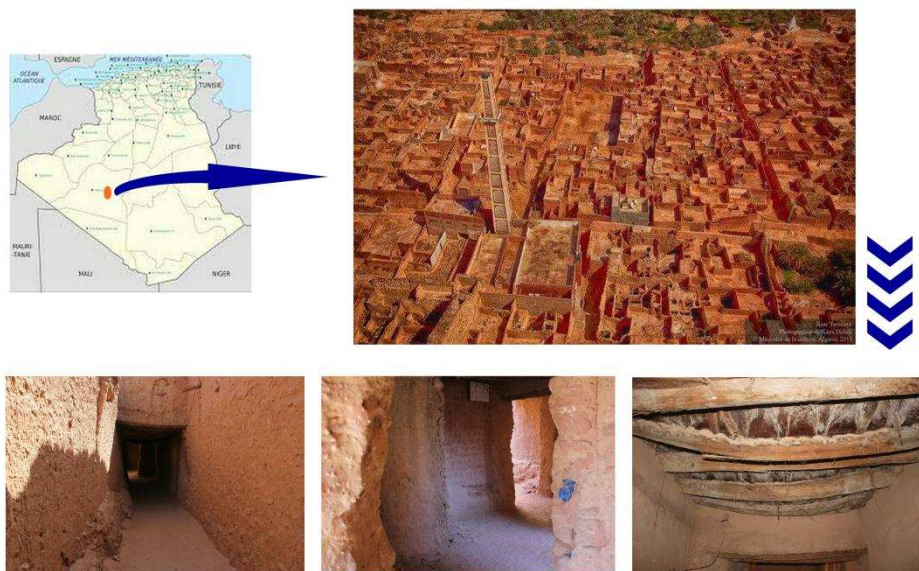


Figure 1. Ksar de Tamentit à Adrar

Le plus ancien ksar construit à base de terre et d'argile est appelé Ksar Tamentit. L'étude historique a montré que son âge s'étend jusqu'à la période préhistorique [10-12], il est situé à 12 km au Sud de la ville d'Adrar, composé de 400 maisons familiales [5] entourées d'une grande oasis de palmiers. Il se trouve également sur une superficie totale de plus de 8 hectares [13].

Le Ksar de Tamentit est situé à 27° 45' 52" de latitude, et 15° 15' 53" de longitude, avec une élévation du niveau de la mer de 240 m (fig. 1). Le climat de cette région est froid en hiver et chaud en été, avec une faible humidité. La température atteint 50°C au mois d'août et 0°C au mois de janvier. Les précipitations sont très rares.

- **Description du ksar**

Le Ksar Tamentit se caractérise par une architecture particulière qui démontre l'interaction de l'homme avec son environnement. Plusieurs tribus berbères, zéniths et autres arabes s'y sont installées.

Notons ensuite l'arrivée de communautés juives, jouant un rôle important dans l'architecture du Ksar. Une architecture remarquable par ses diverses installations religieuses et éducatives, par ses techniques de construction et par les matériaux utilisés, ainsi que par les techniques agricoles et d'irrigation telle que la foggara.

Il n'était pas possible pour les habitants et les constructeurs de la région à cette époque de s'approprier les théories de l'architecture des spécialistes de ce domaine, mais ils pouvaient néanmoins accéder automatiquement à une certaine créativité en leur fournissant la matière première, en s'appuyant sur les compétences de ceux qui viennent dans la région de différents endroits, la façonnant avec leur sens esthétique. Avec leur expérience, ils mettent en évidence leurs affiliations sociales, culturelles et religieuses dans les bâtiments. Ainsi, ils ont formé un style architectural distinct et diversifié, immortalisant une très créative et belle peinture mosaïque.

Ce complexe résidentiel rural (Ksar Tamentit) se compose de plusieurs kasbahs dont les plus importantes sont : Kasbah Tahiqah, Kasbah d'Ouled Ali bin Moussa, Kasbah de Tofaghi, Kasbah d'Ouled M'hamed, Kasbah d'Ouled Daoud, Kasbah Taylot, Kasbah d'OuledIali, Kasbah d'Ouled Yacoub et Kasbah de Bou Salah. En dénominateurs communs, en termes de construction et de conception, chaque Kasbah comprend des maisons et une mosquée, des murs, des tours, des ruelles et des couloirs. Le ksar est au milieu de vastes oasis de palmiers. Également entouré par une tranchée appelée dans le dialecte local Ahfir, cette dernière est utilisée pour la protection et l'obstruction de toute attaque. Un puits d'irrigation est conçu à l'intérieur de chaque kasbah pour fournir de l'eau en cas de guerre. Une entrée principale réalisée avec une porte en bois massif se ferme à l'aide d'une serrure de fabrication locale appelée Afkir. Ces kasbahs ont été construites en zones rocheuses élevées pour les sécuriser et faciliter le processus de surveillance de tous les côtés et les protéger des eaux de pluie et des vallées.

L'aspect social, culturel et religieux a un grand impact sur la conception et la construction de mosquées, de maisons et de divers monuments urbains, ce qui a conféré au Ksar un caractère spécial et distinctif. La maison se compose de trois niveaux : une cave (souterraine) dans certaines maisons, un rez-de-chaussée et une terrasse. Les deux premiers niveaux représentent des espaces jour et nuit

en hiver et diurnes seulement en été, tandis que la terrasse est un espace pour passer la nuit en été.

La maison est composée, à l'entrée, d'un séjour spacieux, un hall entouré de deux ou trois pièces, avec de petites ouvertures, au milieu de la maison. Selon les besoins et les possibilités, une pièce sert de débarras pour les fournitures.

- **Données météorologiques**

Selon la classification de Köppen, cette zone est classée comme sèche et d'après la classification de Marton, l'indice d'aridité atteint 3.96 la région est donc hyper aride [14-16].

- **Température**

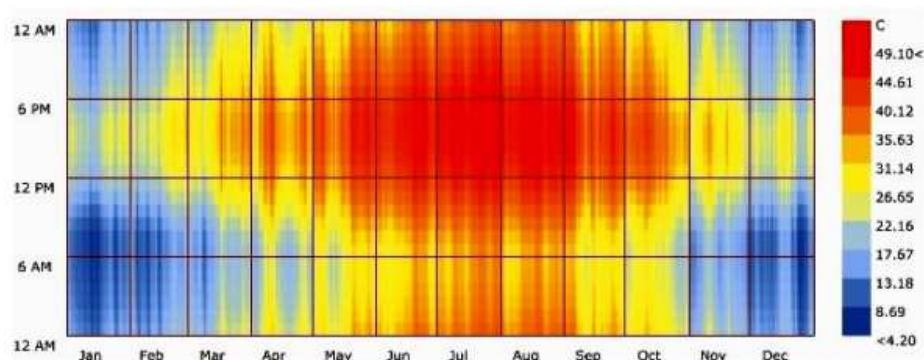


Figure 2 Température à Adrar

La région d'Adrar connaît un changement significatif des températures de l'air sec tout au long de l'année. Nous enregistrons une baisse à moins de 4°C le soir de décembre, de janvier et de février et ne dépasse pas 20°C le jour. A partir de mi-mai, la température dépasse 34°C la nuit et 40°C le jour et continue d'augmenter jusqu'à mi-octobre (fig. 2). Les mois de juillet et août ont les températures les plus élevées. Elles dépassent 45°C la nuit et 55°C le jour, faisant d'Adrar l'une des villes les plus chaudes du monde.

- **Humidité:**

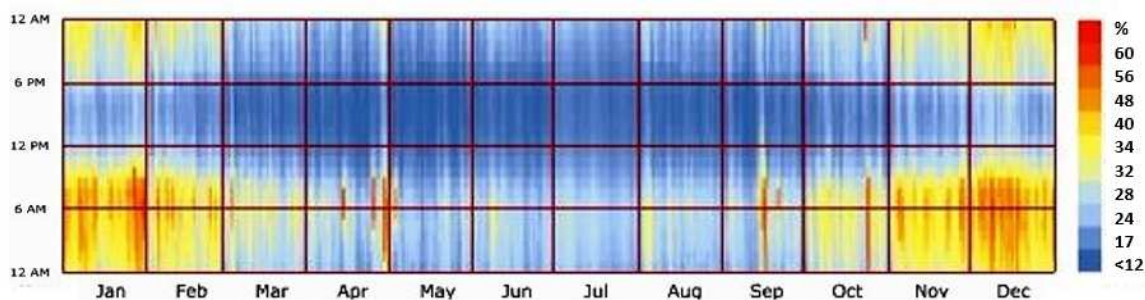


Figure 3. Humidité à Adrar

Pendant la journée et tout au long de l'année, l'humidité relative ne dépasse pas 25 %. Entre mars et octobre, l'humidité relative atteint des niveaux minimaux inférieurs à 5 % le jour et 20 % la nuit. Pendant l'hiver, entre décembre et février, elle atteint un maximum de 50 % la nuit et moins de 30 % le jour. Sauf à l'intérieur de l'oasis, où l'irrigation crée un climat vital qui affecte le niveau de température et augmente l'humidité de l'air (fig. 3).

Les vents dominants dans la région d'Adrar vont du Nord-Est et du Nord. Quant au vent de Nord-Est, il est plus fort entre janvier et avril. Quant à la période de juin à septembre, les vents d'Est s'intensifient. Le vent du Sud-Ouest souffle généralement de mars à mai. Quant aux vents venant du Sud, du Sirocco chargé de sable, ils peuvent atteindre une vitesse d'environ 100 km/h.

- **L'effet des radiations solaires :**

Les radiations solaires directes sont la source la plus importante d'échauffement de l'air et des surfaces. Les figures 4 et 5 présentent, respectivement, la durée d'insolation et la moyenne annuelle d'irradiations globales à Adrar.

D'après ces données, il y a une durée de 11,8hr et une intensité de 6774 kWh/m<sup>2</sup> d'irradiation globale (fig. 4 et 5). Nous constatons que le soleil présente une grande partie d'influence des effets externes sur le bâtiment [17].

Durant l'hiver, le soleil a un faible angle (même à midi) et ses rayons sont proches de l'horizontale. Les façades Sud et proches du Sud des constructions reçoivent ces rayons, en milieu de journée, avec un faible angle d'incidence. Ces derniers reçoivent donc plus d'irradiations solaires qu'en surface horizontale, elles sont favorables au placement de baies vitrées qui pourront capter ces apports solaires bénéfiques. Alors qu'en été, une surface horizontale est fortement exposée à l'irradiation solaire en milieu de la journée à cause de la quasi-verticalité des rayons. Les surfaces verticales Sud et proches du Sud reçoivent une irradiation très modérée. Mais en milieu de matinée et l'après-midi, lorsque le soleil se trouve à l'Est puis à l'Ouest, ces rayons frappent de front les surfaces verticales Est et Ouest qui doivent en principe en être protégées

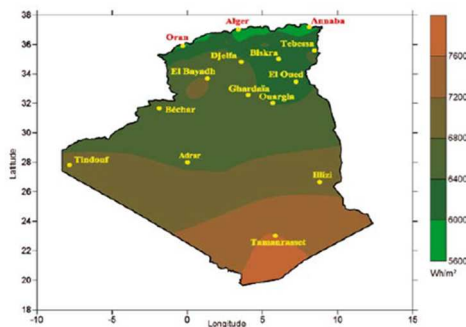


Figure 4. Moyenne annuelle d'irradiation

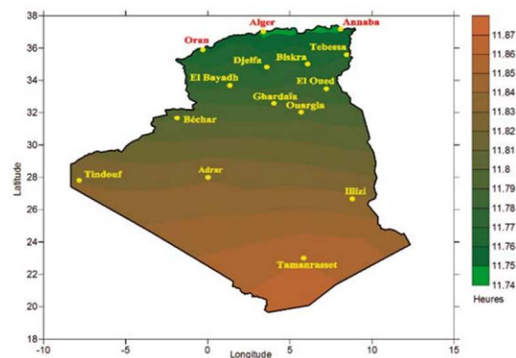


Figure 5. Moyenne annuelle de la durée d'insolation

- **Analyse des matériaux**

Dans le passé, les gens comptaient sur des matériaux locaux dans la construction du Ksar, les murs étaient construits avec des briques en argile et en sable, mais ce dernier ne résiste pas aux facteurs météorologiques. Nos ancêtres ont utilisé une couche externe d'un matériau qu'ils appellent localement Agharf, qui est une argile mélangée avec des sables salins naturels.

Après avoir examiné la zone et prélevé des échantillons de sable utilisés dans ce mélange, nous avons trouvé un pourcentage élevé de sulfate estimé à 17493 mg/kg.

Pour connaître l'importance du rôle des sels de sulfate dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques de la brique d'adobe, nous avons effectué une comparaison entre une brique confectionnée avec un sable ordinaire et des briques faites avec du sable salin. Nous avons finalement conclu que les sels de sulfate améliorent les propriétés mécaniques d'environ 30 à 36 % [18].

La figure 6 montre une partie d'une brique extraite de la couche extérieure de la paroi extérieure du Ksar, où nous voyons la transformation des briques de sel sous l'effet de la pluie et de la température en un semi-rocheux.

C'est ce qui a fait que les murs du Ksar sont durables depuis plusieurs siècles, malgré la dureté du climat et la faible résistance des matériaux utilisés.



Figure 6. Mur construit en adobe salin

- **Mesures du climat interne**

Pour étudier le milieu climatique interne du Ksar, nous avons installé des instruments de mesure et d'enregistrement tout au long de l'année, ces appareils répondent aux recommandations de la ASHRAE-55 (**fig. 7**), le tableau suivant montre les caractéristiques de ces appareils.

**Tableau 1 Information des instruments de mesure**

Instrument	Grandeur physique	Précision et plage
HI 955502 [19]	Température	$\pm 0.2$ °C
Testo 175 T3	Température	$\pm 0.5$ °C, 50 -70 °C

Figure 7. Mesure à



l'intérieur

## 2. Résultats

La figure 8 montre l'évolution de température à l'intérieur des maisons construites en adobe et le changement de température à l'extérieur du Ksar au cours de la période d'été. Nous avons choisi la période entre le 1 et le 14 juillet, qui est la période la plus chaude de l'été, où nous notons que la température extérieure enregistre une grande valeur pouvant atteindre 48 °C pendant la journée et 27 °C la nuit, avec une différence quotidienne de plus de 17 °C.

La température interne dans les maisons est presque stable et varie entre 30 et 33 °C, stabilité que l'on peut relier à l'inertie thermique élevée des murs. Nos essais avec l'appareil isomet2104 sur l'adobe de ce ksar nous donnent une valeur de conductivité thermique de 0.63 [W/m K], une chaleur spécifique de 1350 j/kg K pour une masse volumique de 1640kg/m<sup>3</sup>.

Les murs en adobe sont des murs épais, d'épaisseur variant entre 25 cm (interne) et 45 cm (externe) et l'urbanisme du Ksar aide à contrôler la circulation de l'air.

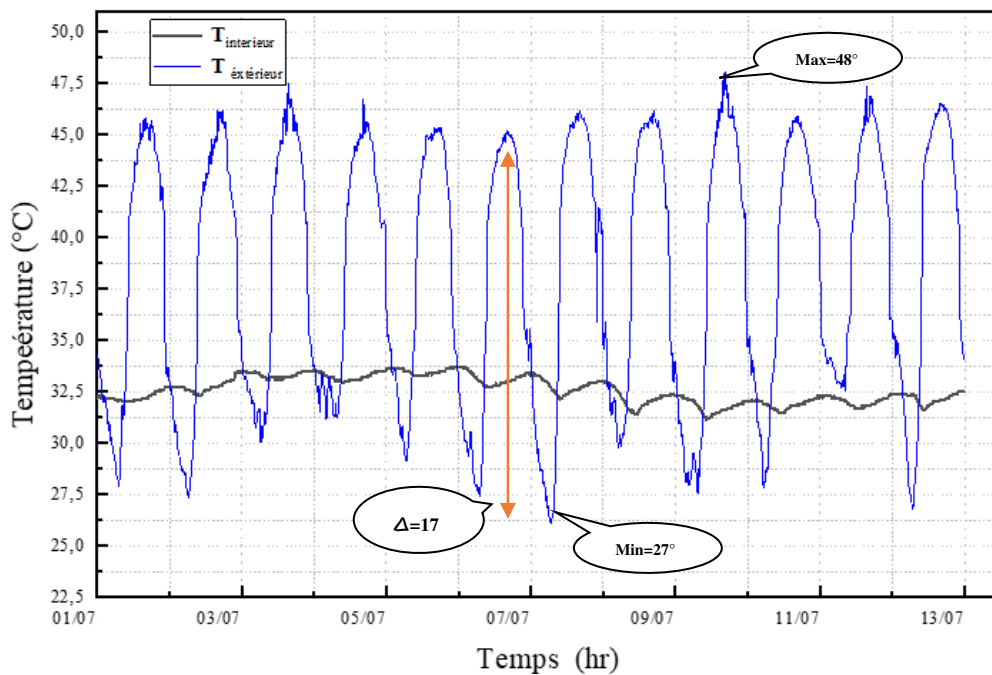


Figure 8. Evolution de la température au mois de juillet

La figure 9 montre la variation de la température à l'intérieur et à l'extérieur des maisons construites en adobe, au mois de mars.

Nous remarquons la même évolution de la température à l'intérieur et à l'extérieur, où la température externe atteint 30 et 35 °C et parfois 40°C, tandis que l'environnement interne enregistre une température semi stable variant entre 20 et 24 °C, avec une différence de 15 °C entre l'intérieur et l'extérieur.

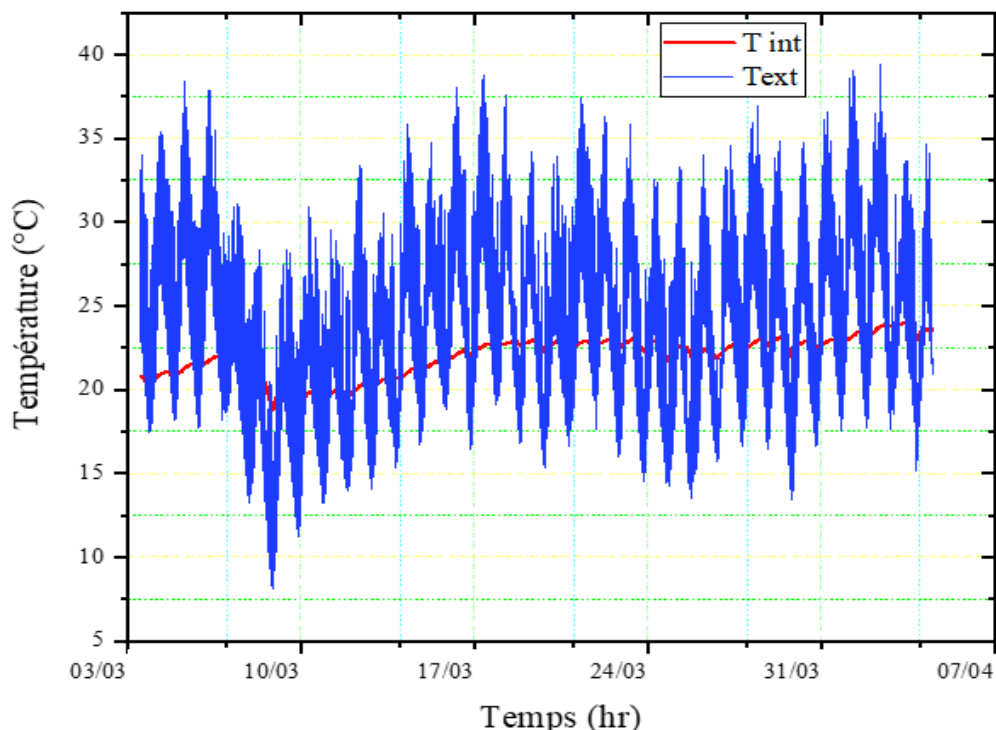


Figure 9. Evolution de la température au mois de mars

### 3. Conclusion

Cette recherche avait comme objectif l'étude de l'efficacité thermique du mur dans les Ksour en adobe en zone aride. Les résultats obtenus nous permettent de conclure les points suivants :

- La température interne dans les maisons du Ksar construit en adobe est presque constante, malgré la différence entre l'intérieur et l'extérieur prouvant que l'adobe utilisé dans les murs et le plancher des Ksour offre une isolation presque parfaite de l'environnement intérieur contre les facteurs externes.
- La capacité de l'adobe à isoler un bâtiment et à engendrer un déphasage de plus de 4 heures entre l'extérieur et l'intérieur permet de piéger l'air frais de la nuit à l'intérieur du bâtiment et d'éviter l'effet de la haute température de la mi-journée par l'ouverture des fenêtres le soir.
- L'utilisation de sable salin donne une protection et augmente la résistance du mur et présente la solution fiable pour conserver ces patrimoines durant des siècles.
- Les résultats recommandent l'utilisation de l'adobe fabriqué à partir de sable salin comme matériau de construction pour les nouveaux bâtiments. Il est également très encourageant de l'utiliser comme matériau pour la restauration d'anciens bâtiments en adobe connus localement sous le nom de Ksar.



## Références

- [1] G. Minke, *BUILDING WITH EARTH: design and technology of a sustainable architecture.*, BIRKHAUSER, [S.l.], 2021.
- [2] M. Vellinga, P. Oliver, A. Bridge, *Atlas of vernacular architecture of the world*, 2007.
- [3] A.P.K. Olukoya Obafemi, Sevinç, Environmental impacts of adobe as a building material: The north cyprus traditional building case, *Case Studies in Construction Materials* 4 (2016) 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.12.001>
- [4] S. Maini, *Earthen architecture for sustainable habitat and compressed stabilised earth block technology*, The Auroville Earth Institute, Auroville Building Center-India (2005).
- [5] E. Adam, A. Agib, *Compressed stabilised earth block manufacture in Sudan*, France, Paris: Printed by Graphoprint for UNESCO (2001).
- [6] K. Hadjri, M. Osmani, B. Baiche, C. Chifunda, Attitudes towards earth building for Zambian housing provision, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, Thomas Telford Ltd, 2007, pp. 141-149.
- [7] M.S.L. Zami, Angela, Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing – State-of-the-art review, *Journal of Building Appraisal* 5(3) (2010) 259-271. <https://doi.org/10.1057/jba.2009.32>
- [8] A. Shukla, G.N. Tiwari, M.S. Sodha, Embodied energy analysis of adobe house, *Renewable Energy* 34(3) (2009) 755-761. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.002>
- [9] F. Naïma, B. Mébirika, D. Belkacem, R. Claude-Alain, The Traditional House with Horizontal Opening: A Trend towards Zero-energy House in the Hot, Dry Climates, *Energy Procedia* 96 (2016) 934-944. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.169>
- [10] M.A. Djeradi, *L'architecture ksourienne (Algérie) entre signes et signifiants*, L'architecture vernaculaire (2012).
- [11] A.G.P. Martin, *Les Oasis Sahariennes (Gourara - Touat - Tidikelt)*, Creative Media Partners, LLC2018.
- [12] J. Oliel, *Les Juifs au Sahara: le Touat au moyen âge*, CNRS editions1994.
- [13] J.O. ALGERIENNE, Décret exécutif n° 16-137, portant création et délimitation du secteur sauvegardé du vieux Ksar de Tamentit., *JOURNAL OFFICIEL ALGERIENNE* 27 (4 Mai 2016) 5.
- [14] G. Guyot, *Climatologie de l'environnement* Dunod, Paris. France, 1999.
- [15] E. De Martonne, *Aréisme et indice d'aridité*, Gauthier-Villars1926.
- [16] H.N.L. Houérou, *Bioclimatology and Biogeography of Africa*, Springer2009.
- [17] M.R.B. Yaiche, Abdellah, *Atlas solaire algérien*, Centre de Développement des Energies Renouvelables2002.
- [18] A. Bassoud, H. Khelafi, A.M. Mokhtari, A. Bada, Effectiveness of Salty Sand in Improving the Adobe's Thermomechanical Properties: Adrar Case Study (South Algeria), *Trends in Sciences* 18(19) (2021) 6-6.
- [19] h. instruments, *Instruction Manual HI 955502 Portable PT100 Thermometer* (1998).