

L'Agdal du Haut Atlas, valeur patrimoniale naturelle, sociale et culturelle, face aux changements climatiques dus aux extrêmes de chaleur et de froid

EL HARROUNI Khalid¹ , EL HARROUNI Rime^{2,3} , OUKASSI Khadija⁴

¹Professeur, Chaire UNESCO, Ecole Nationale d'Architecture de Rabat, Maroc

Membre expert ICOMOS - Isc : ISCARSAH, ISCES et CIVVIH

²Architecte, Doctorante, Ecole Euro-Méditerranéenne d'Architecture, de Design et d'Urbanisme, Université EuroMed de Fès, Maroc

³Architecte, Doctorante, Faculté d'Architecture et d'Urbanisme, Université de Mons, Belgique

⁴Docteur en Sciences de l'Information et de la Communication, Membre ICOMOS Maroc

k.elharrouni@enarabat.ac.ma auteur correspondant

Résumé

L'Agdal, situé dans le Haut Atlas marocain, fait référence à des zones de terres communales réglementées par des groupes locaux tels que des villages ou des fractions tribales. Ces zones garantissent un accès équitable à tous les utilisateurs et propriétaires. Actuellement, ces sites culturels importants font face à diverses menaces naturelles, qui ont été exacerbées par les changements climatiques. En particulier, les températures extrêmes causées par les changements climatiques ont un impact direct sur les bâtiments historiques et les sites patrimoniaux de l'Agdal, situés dans les régions du Haut Atlas. Par conséquent, la population vivant dans ces zones fait face à un froid extrême en hiver et à une chaleur excessive en été. Les techniques de construction traditionnelles utilisant des matériaux locaux offrent une durabilité et une résilience accrues face aux impacts climatiques. Cet article se concentre sur l'amélioration de l'enveloppe des bâtiments traditionnels situés dans les villages de l'Agdal afin d'améliorer le confort thermique et de réduire les pertes de chaleur. L'étude repose sur les principes de l'architecture bioclimatique, de la performance thermique et de l'efficacité énergétique passive, dans deux contextes climatiques différents : chaud et froid. La mise en œuvre de pratiques durables et réglementaires, et l'adoption d'une approche bioclimatique contribuent à renforcer la résilience climatique et à préserver l'environnement.

Mots clés : Villages de l'Agdal, Haut Atlas, changements climatiques, architecture bioclimatique, matériaux locaux, réglementation

1. Introduction

Les régions de l'Atlas et du Draa Tafilalet, dans le sud-est du Maroc, sont réputées pour leur architecture distinctive en terre et en pierre, notamment leurs kasbahs, leurs ksour, leurs villages, leurs greniers, ..., (Figures 1-7). Ces structures, construites avec des matériaux locaux et des techniques traditionnelles, reflètent le patrimoine historique et culturel de ces régions. Cependant, ces objets patrimoniaux sont de plus en plus menacés par l'activité sismique et le changement climatique.

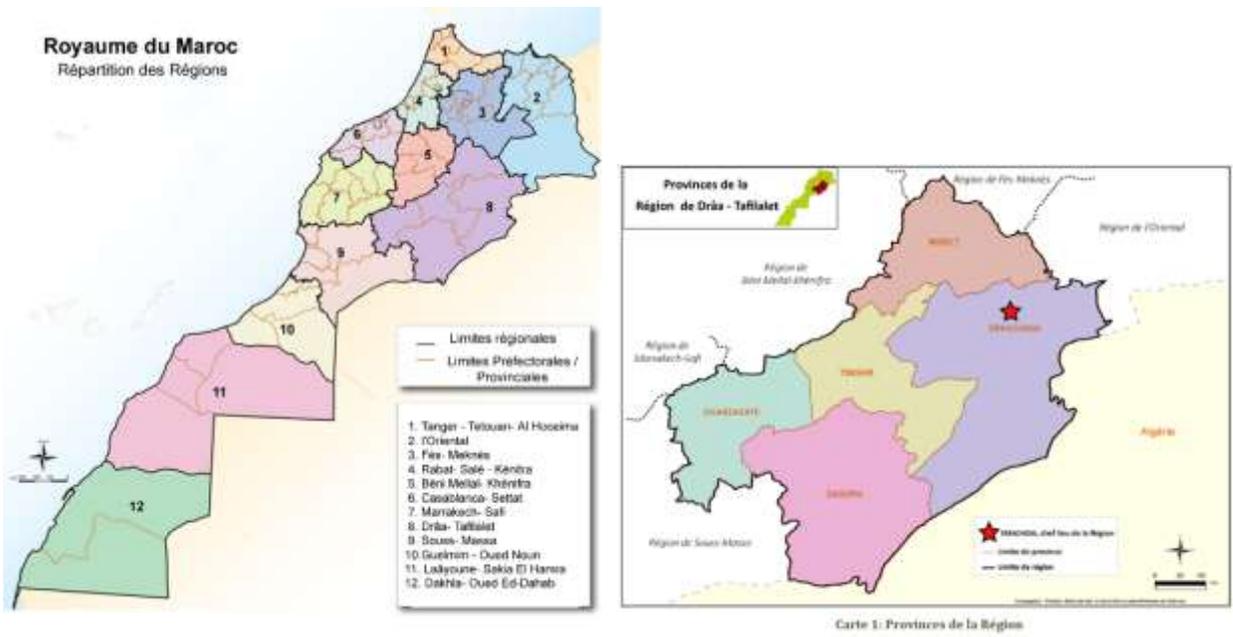


Figure 1 : Région Draa-Tafilalet (Source : <https://collectivites-territoriales.gov.ma/fr/la-region>)

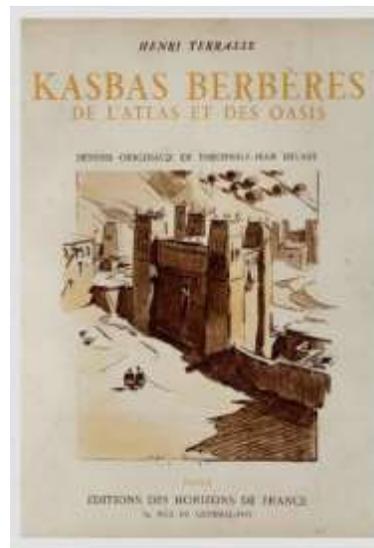


Figure 2 : Terrasse H., Kasbas berbères de l'Atlas et des Oasis, Ed. des Horizons de France, Paris, 1938



Figure 3 : Patrimoine architectural en terre, exemple du Ksar Ayt Yahya O'athmane, Province Errachidia



Figure 4 : Patrimoine architectural en terre, exemple du Ksar Ait Ben Haddou, Province Ouarzazate

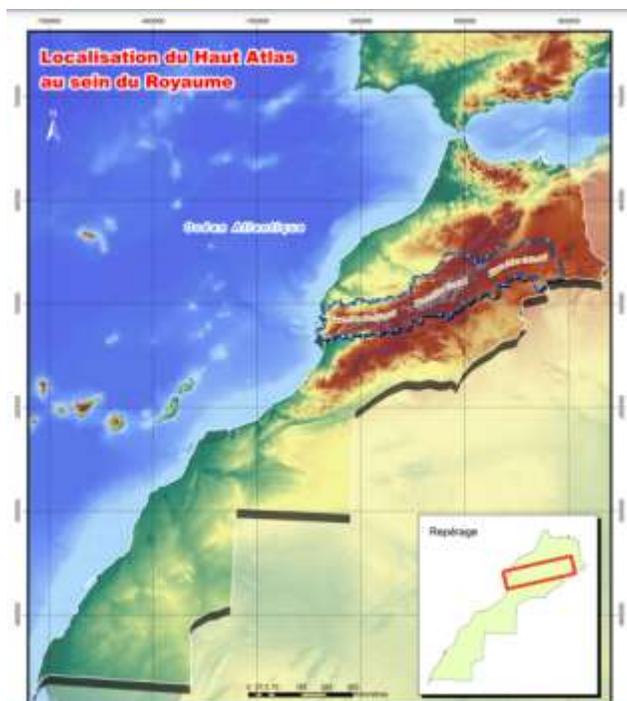


Figure 5 : Le Haut Atlas

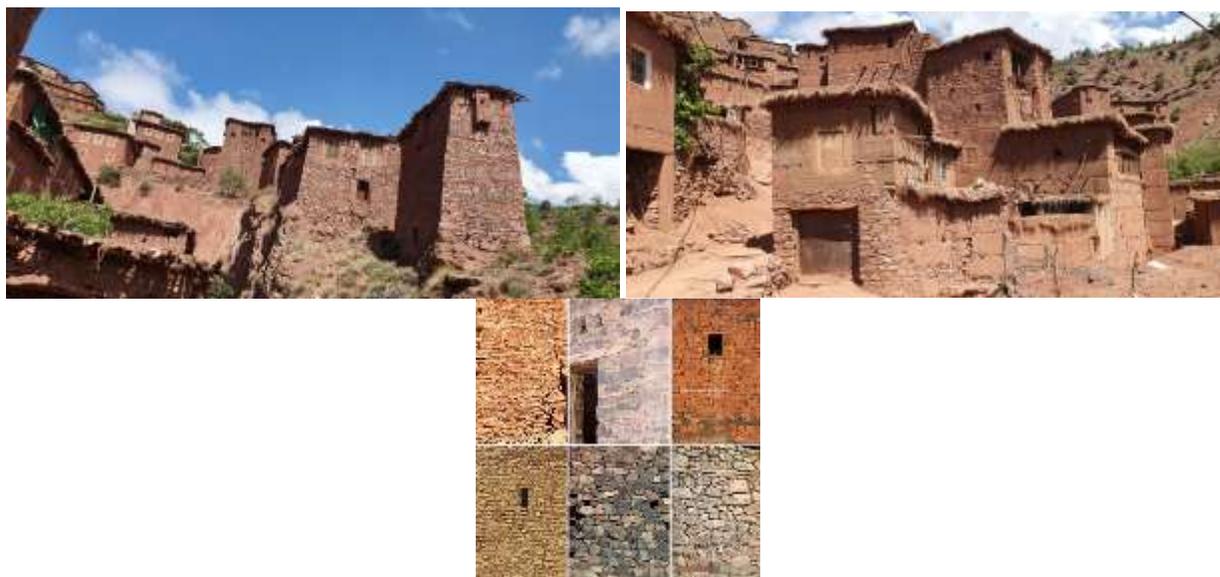


Figure 6 : Exemple d'architecture vernaculaire en pierre dans le Haut Atlas



Figure 7 : Exemple d'Agdal dans le Haut Atlas

L'Agdal dans le Haut Atlas marocain désigne l'ensemble des espaces en propriété commune dont l'accès et les usages sont réglementés par un groupe local (village, fraction tribale...). Les pratiques de l'Agdal présentent une grande diversité : On distingue les Agdals pastoraux et forestiers et même agricoles ainsi que les greniers fortifiés et collectifs en fonction des usages qui leur sont associés: réglementation du pâturage dans le premier cas, réglementation des prélèvements de bois dans le second, et réglementation de la banque des biens dans le troisième cas en étroite relation avec les autres cas. Les objectifs assignés par la population font parfois explicitement référence à la protection des ressources, du patrimoine naturel, culturel (matériel et immatériel). C'est une institution communautaire de gestion des ressources patrimoniales et support de cohésion sociale.

L'Agdal du Haut Atlas, situé dans les montagnes du Maroc, est bien plus qu'une simple région montagnaise. Il incarne un patrimoine naturel, social et culturel unique qui témoigne de la relation entre les communautés Amazighes et leur environnement. Cependant, cet équilibre fragile est aujourd'hui menacé par les changements climatiques, caractérisés par des extrêmes de chaleur et de froid, qui mettent à l'épreuve la résilience de cet écosystème et des populations qui en dépendent.

Cet écosystème naturel précieux se distingue par sa biodiversité exceptionnelle. Les forêts, prairies alpines, et cours d'eau abritent une flore et une faune riches et variées. Les espèces endémiques et les plantes médicinales, essentielles à la pharmacopée traditionnelle Amazighe, y prospèrent. Cet écosystème complexe joue un rôle crucial dans la régulation des cycles hydrologiques et dans la préservation des sols.

L'Agdal est également un lieu de richesse culturelle, considéré comme un héritage social et culturel. Les communautés Amazighes, qui vivent dans ces montagnes, ont développé un mode de vie en harmonie avec leur environnement. Les traditions orales, les savoir-faire artisanaux et les rituels religieux et festifs constituent un patrimoine immatériel inestimable. Les fêtes de l'Agdal, célébrées pour marquer l'ouverture ou la fermeture des pâturages, renforcent les liens communautaires et perpétuent les traditions ancestrales.

La langue amazighe, parlée par les habitants, est un vecteur essentiel de cette culture. Elle transmet les connaissances écologiques et les pratiques de gestion des ressources naturelles de génération en génération. Cette transmission orale est essentielle à la préservation de l'identité culturelle des communautés du Haut Atlas.

Ces espaces sont considérés comme un outil contribuant à maintenir la résilience du système montagnard, dans un milieu contraignant marqué par les aléas et la pauvreté et l'enclavement de

la montagne, notamment les interactions qui existent entre les divers facteurs intervenant dans la reproduction et l'amélioration des moyens d'existence et de survie ; la notion de gestion des risques pour l'adaptabilité et la résilience ; le défi climatique et énergétique avec une forte consommation de bois de feu qui va dans le sens inverse de la notion du développement durable.

La durabilité exige une compréhension globale des systèmes et une collaboration interdisciplinaire entre l'architecture, le design climatique, les sciences économiques et l'ingénierie (génie civil, thermique, énergétique, ...). La conception des espaces architecturaux durables pour les usagers doit être l'un des piliers essentiels de toute stratégie de développement durable et de protection face aux catastrophes naturelles : les séismes et les températures extrêmes dues au changement climatique, notamment pour la population en milieu rural qui souffre du froid pendant l'hiver, et de la chaleur pendant l'été, dans l'Agdal du Haut Atlas.

Au Maroc, on commence à comprendre que l'investissement dans la qualité environnementale, dans la performance thermique et énergétique, est non seulement un atout, mais un gisement d'économies durables. Le patrimoine bâti avec des matériaux traditionnels locaux (terre, bois, pierre, ...), une fois amélioré, est en mesure de prouver qu'il est respectueux de l'environnement, résilient sur le plan climatique, et qu'il ne présente aucun risque pour la santé des usagers.

Cet article essaye d'explorer la vulnérabilité climatique de ces bâtisses en matériaux locaux dans des Villages, et de proposer ainsi des stratégies d'adaptation pour améliorer la résilience climatique. L'approche est basée sur l'observation et le diagnostic du cadre bâti sur le terrain; l'approche utilise ensuite le cadre réglementaire thermique (le Règlement Thermique des Constructions au Maroc, RTCM¹) ainsi que les principes et les outils de l'architecture bioclimatique pour la performance énergétique et le confort thermique dans deux contextes climatiques différents : chaud et froid.

La mise en œuvre de pratiques durables et réglementaires, et l'adoption de ces approches bioclimatiques, contribuent à faire face au défi climatique.

2. Vulnérabilité sismique de l'architecture en terre et en pierre

2.1 Caractéristiques structurelles

Les bâtisses en terre et en pierre dans le Haut Atlas et la Région Draa-Tafilalet, y compris les Agdals, présentent généralement des murs épais et des toits plats. Le matériau en terre, tel que le pisé, offre une excellente isolation thermique mais reste fragile et sensible aux forces sismiques. Les constructions en pierre, bien que plus robustes, peuvent également subir des dommages importants lors des tremblements de terre, surtout si elles ne sont pas correctement entretenues ou bien contreventées.

¹ Royaume du Maroc, Bulletin Officiel, Décret N° 2.13.874 Approuvant le Règlement Général de Construction Fixant les Règles de Performance Énergétique des Constructions et Instaurant le Comité National de l'Efficacité Énergétique dans le Bâtiment, 2014.

2.2 Évaluation des risques sismiques

Les événements sismiques historiques ont causé des dommages considérables aux structures en terre et en pierre, soulignant la nécessité d'évaluations détaillées des risques sismiques et de stratégies d'atténuation des risques. Les modes de défaillance courants incluent la fissuration des murs, l'effondrement des sections non soutenues ou non contreventées, et le détachement du toit.

Notre patrimoine architectural est d'autant plus précieux qu'il recèle souvent des productions d'artisans qualifiés, de véritables œuvres d'art et d'architecture difficiles et coûteuses à reproduire. D'après les sources documentaires de la sismicité historique² et les travaux de recherche effectués dans ce domaine³, ce patrimoine a été affecté à plusieurs reprises par des séismes plus ou moins violents. Bien entendu, les communautés anciennes connaissaient les tremblements de terre et les différents points sensibles d'un bâtiment. Ils réagissaient en appliquant des techniques constructives dans leur habitat, sur les édifices publics et religieux : une culture sismique existait.

La position géologique du Maroc à la rencontre de plusieurs plaques tectoniques en interaction est la raison pour laquelle, historiquement, les villes marocaines ont été détruites à plusieurs reprises par plusieurs tremblements de terre. Certaines villes ont été partiellement ou totalement détruites. Ce n'est qu'au début du XXe siècle que l'on a commencé à disposer d'informations fiables et scientifiques sur les tremblements de terre au Maroc ; les premières études scientifiques de 1904 avaient montré que le Maroc, comme les autres pays méditerranéens, était exposé aux tremblements de terre. A partir de 1932, l'Institut scientifique Chérifien (devenu Institut Scientifique) organisa des enquêtes macro-sismiques grâce au réseau d'observations météorologiques. La richesse de ces données dépend de l'intensité du séisme et de la proximité de l'épicentre des villes historiques, culturelles et politiques, telles que Fès, Marrakech, Meknès au centre du Maroc ou des centres économiques tels que les ports atlantiques de Tanger au nord et Agadir au sud.

Du 9ème au 11ème siècle, les tremblements de terre ont été décrits brièvement : les écrits se référaient à la destruction de constructions sans autre précision. La description est devenue relativement plus détaillée mais l'objectif est resté purement informatif. C'est au 17ème siècle que l'on trouva dans un courrier particulier les détails des tremblements de terre de 1624 et 1663 : les dommages qui affectèrent les bâtiments de Fès furent mentionnés de manière détaillée. L'ampleur de la destruction du séisme de 1755, le tremblement de terre de Lisbonne, a été évoquée par plusieurs sources : les destructions concernaient même les palais et les mosquées de Meknès, tandis que les dégâts étaient moins impressionnants à Fès.

² Les séismes les plus emblématiques :

Avant le 20ème siècle : Le 11 mai 1624, le 1er novembre 1755 de Lisbonne et le 27 novembre 1755 sont les trois dates retrouvées dans les livres d'histoire, qui ont affecté les médinas. D'autres séismes plus ou moins documentés ont affecté les villes historiques: Larache en 1276, Tétouan et Fès en 1522, villes côtières et Marrakech en 1722, Agadir en 1731, Salé en 1757, Tanger, Fès et Salé en 1773, ...

Après le 20ème siècle : Les environs de Tétouan 1909 ; Les environs de Fès 1929 ; Agadir 1960 ; Atlantique 1969 ; Missouri 1985 ; Moulay Idriss 1987 ; Essaouira 1988 ; Rissani 1992 ; Al Hoceima 1994 ; Rabat 2001 ; Al Hoceima 2004; Al Haouz 2023.

³ El Mrabet T., La Sismicité Historique du Maroc. Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Rabat: FLSH, Université Mohamed V, 1991.

Le Maroc, situé dans une région qui constitue une frontière limite entre les plaques tectoniques Africaine et Eurasienne, est exposé à un certain nombre de risques naturels tels que les tremblements de terre. Il est sous l'influence de la faille sismique Açores-Gibraltar qui est une faille de transformation complexe majeure et qui a provoqué dans le passé de très grands séismes.

Les études récentes du Centre National de Recherche Scientifique et Technique au Maroc évoquent deux principaux résultats : 70% de risque de séisme de magnitude 7,0 sur une période de 100 ans pour certaines régions ; plus de 20% de la population totale vit dans des zones géographiques actives sur le plan sismique et où des risques modérés pouvant provoquer des séismes majeurs peuvent se produire au moins une fois dans la vie.

La Figure 8 montre la sismicité enregistrée au Maroc et dans les régions voisines au cours de la période 1901-2010. Au nord du Maroc, la faille de forte sismicité s'étend du détroit de Gibraltar jusqu'à l'océan Atlantique. Cette ligne de sismicité reflète les interactions entre les plaques tectoniques Africaine et Eurasienne en collision à la frontière qui les sépare. C'est ce qui fait que l'activité sismique se concentre dans cette partie au nord du Maroc.

Sur la partie continentale du Maroc, la Figure 8 indique clairement que l'activité sismique est principalement concentrée le long des montagnes du Rif et de l'Atlas. La région dans l'extrême nord du Maroc est la plus active et où les tremblements de terre d'Al Hoceima en 1994 et 2004 ont eu lieu et avaient causé de graves dégâts dans la région d'Al Hoceima. Malheureusement, c'est le séisme d'Al Haouz en 2023 qui est le plus violent en causant la mort de plus de 2800 personnes et le nombre important de bâtisses en terre détruites a montré que ce cadre bâti en matériaux locaux est très vulnérable aux tremblements de terre quand il ne respecte pas les dispositions réglementaires.

2.3 Retour sur le Séisme d'Al Haouz

Le dernier événement sismique d'Al Haouz du 8 Septembre 2023 fournit des informations précieuses sur les types de dommages subis par les bâtisses en terre et en pierre. L'analyse détaillée de ces études de cas révèle des schémas de défaillances structurelles et aide à identifier les domaines clés à améliorer dans les pratiques de construction et les techniques de rénovation. Mais le problème pertinent est la non application des règles sismiques... .

L'analyse de l'impact peut fournir des informations précieuses sur la préservation et la fortification des sites historiques contre les catastrophes naturelles. L'analyse a pris en compte l'approche structurée suivante :

-Documentation et évaluation : nous avons rassemblé une documentation complète sur l'impact du tremblement de terre d'Al Haouz sur les sites et les structures du patrimoine. Cela comprend une documentation visuelle, des évaluations structurelles et des enregistrements historiques de leurs conceptions originales (voir les références).

-Analyse et échange d'experts par visioconférence et participation aux réunions en présentiel organisées par l'Académie du Royaume du Maroc ; l'Université et les établissements d'enseignement supérieur ; le ministère de l'Aménagement du territoire national, de l'urbanisme, du logement et de la politique de la ville ; l'Ordre National des Architectes et Ingénieurs ; et certaines ONG comme le comité national de l'ICOMOS (Conseil International des Monuments et des Sites). Nous avons travaillé avec des experts en architecture, en ingénierie de Génie Civil, en

préservation historique et en résilience sismique. Nous avons organisé des discussions, des séminaires et des ateliers au cours desquels ces experts ont partagé leurs points de vue sur les vulnérabilités spécifiques exposées par le tremblement de terre d'Al Haouz et principalement sur l'impact sur des sites patrimoniaux.

-Diagnostic et analyse structurelle : Nous avons comparé les dégâts subis par les objets patrimoniaux ou objets de l'architecture vernaculaire dans la région d'Al Haouz. Nous avons évalué les différences dans leur intégrité structurelle, les matériaux utilisés ou les facteurs géographiques qui ont pu influencer les dommages.

-Identification des meilleures pratiques : Nous avons identifié les méthodes de préservation ou les améliorations structurelles qui auraient pu atténuer les dommages. Cela inclut des techniques de rénovation, des améliorations matérielles ou des changements dans les méthodes de construction tout en respectant la valeur patrimoniale.

Il faut dire que le séisme d'Al Haouz était violent avec une magnitude de 6,8 sur l'échelle de Richter ; l'épicentre de profondeur 18 Km est situé à environ 70 Km au sud de Marrakech, dans les montagnes de Haut Atlas. Des mouvements de sol ont été enregistrés sur plusieurs sites au Maroc, dans un rayon qui a atteint 500 Km. L'accélération maximale du sol a atteint plus de 50% de la pesanteur g (Figures 9-10), deux fois et demi supérieure à celle donnée par le Règlement Parasismique des Construction en Terre ($A_{max} = 20\%g$ dans la Figure 11).

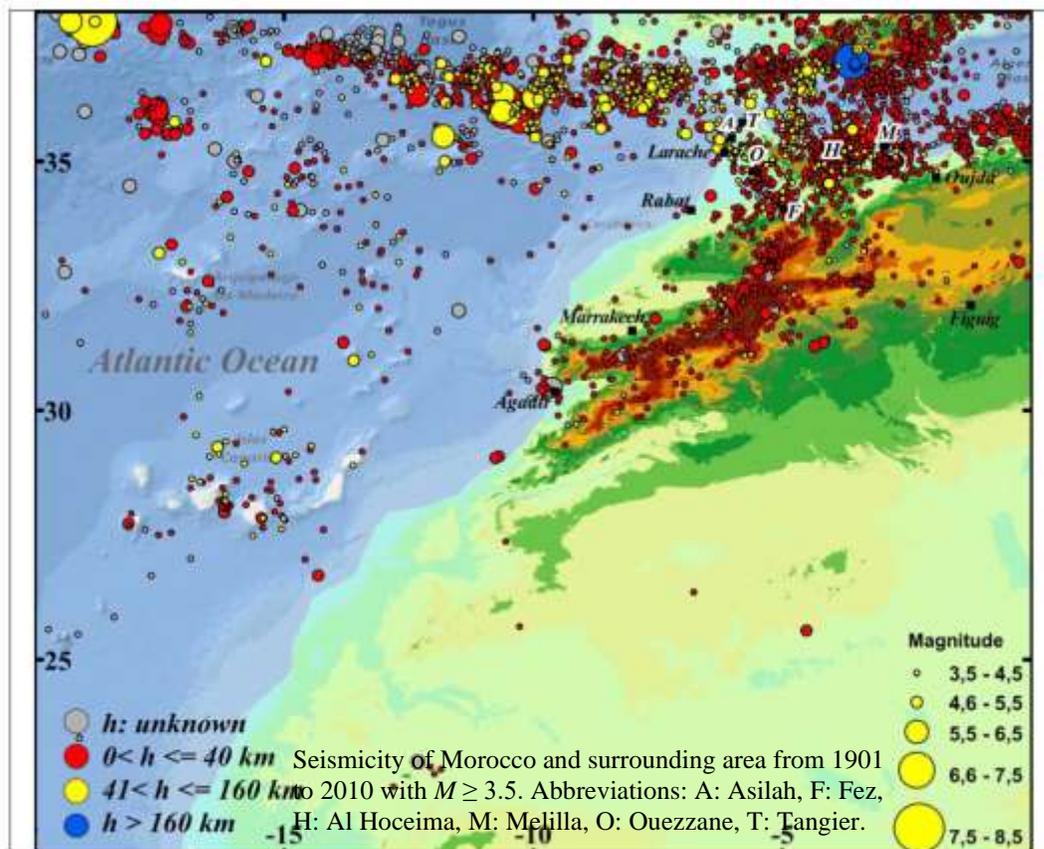


Figure 8 : Carte de sismicité du Maroc 1901 – 2010.

(Source: E. Cherkaoui et A. El Hassani, *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, Section Sciences de la Terre, 2012, n°34, p. 45-55)

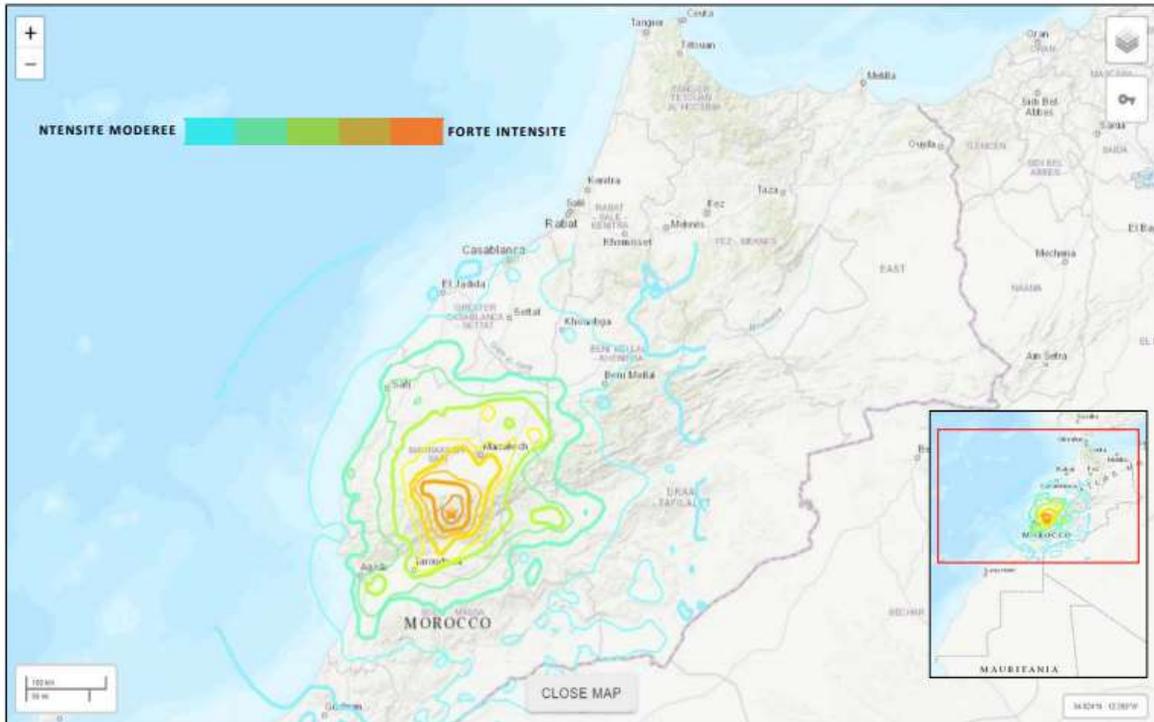


Figure 9 : Intensité du séisme ressenti selon l'échelle Mercalli (selon USGS)

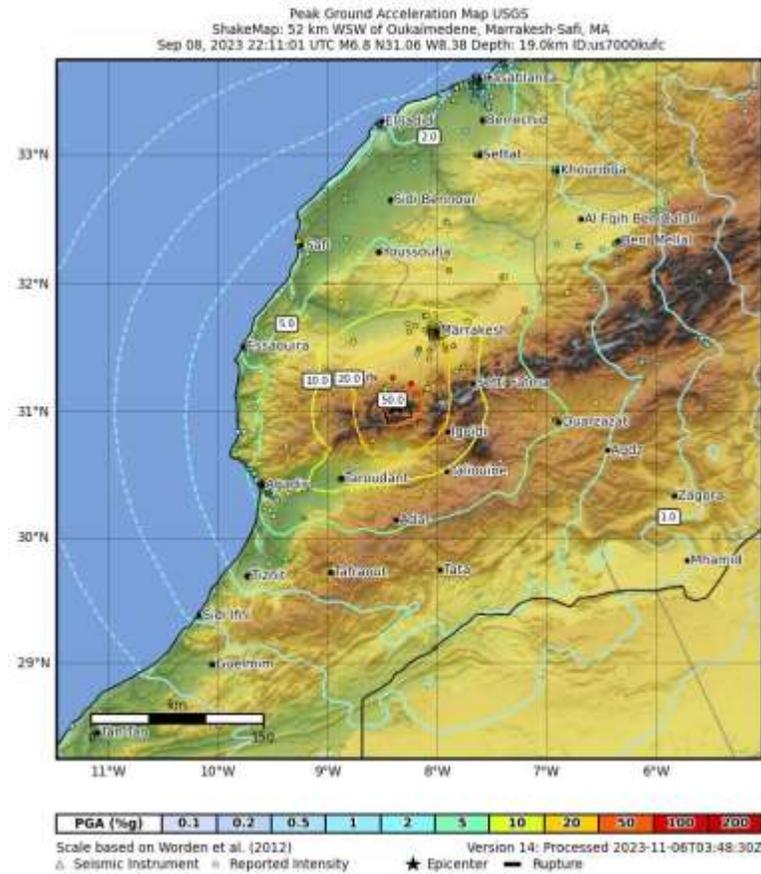


Figure 10 : Carte d'accélération maximale du sol-PGA, séisme d'Al Haouz (Source : USGS)

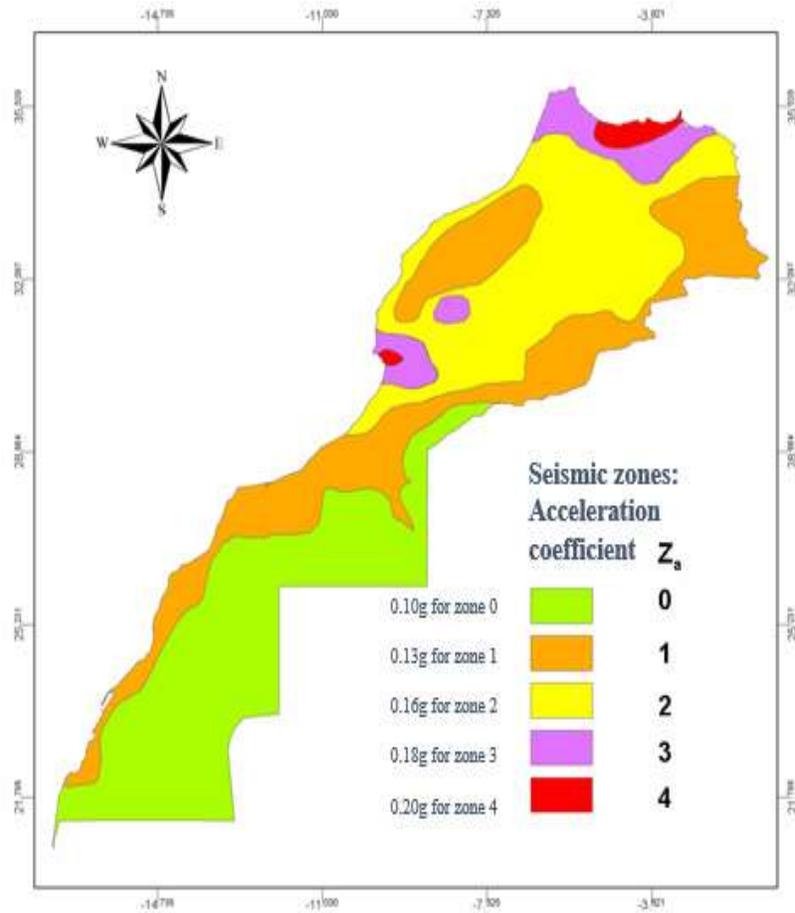


Figure 11 : Carte du zoning sismique avec l'accélération max de 20%g selon le RPCT



Figure 12 : Exemple de la Mosquée Tinnel, avant et après le séisme d'Al Haouz

Même si le séisme d'AlHaouz était violent, quelques bâtisses avec les matériaux locaux ont pu résister grâce à leur mise en œuvre selon les normes et les règles de l'art. Pour le cadre bâti, construit avec les matériaux locaux (terre, bois, pierre), de type patrimonial ou type vernaculaire, qui a été sévèrement endommagé, les raisons étaient multiples : le non-respect des règles, l'effet du site, la qualité des matériaux et leur mise en œuvre, la construction sans fondation ni contreventement ou renforcement,

C'est ainsi que le Règlement Parasismique des Constructions en Terre s'applique :

- Aux constructions en terre soumises à l'obligation de recours à un architecte et à un bureau d'études pour l'obtention du permis de construire. Les éléments porteurs principaux sont des murs en adobe, pisé, bauge ou moellons de pierres à mortier de terre. Le matériau terre peut être stabilisé ou non.
- Les Constructions sont limitées à un niveau en zones d'accélération maximale (de 18%g à 20%g) et à deux niveaux en zones d'accélération maximale (de 10%g à 16%g).
- Les constructions en terre d'importance vitale de type : hôpitaux, cliniques, établissement de protection civile, les postes de police, les bâtiments administratifs de centre de décision en cas de séisme, sont limités à un seul niveau dans toutes les zones.
- Les constructions en terre destinées au grand public de type : écoles, universités, bibliothèques, musées, grands lieux de culte, centres commerciaux, etc..., sont limitées à un seul niveau en zones d'accélération maximale (de 18%g à 20%g).
- La hauteur maximale des murs porteurs en terre est 4m pour une construction à un seul niveau et 6.5m pour une construction à deux niveaux.
- L'épaisseur minimale des murs porteurs : 0,4 m et celle des murs cloisons : 20 cm
- La longueur du mur entre deux murs successifs qui lui sont orthogonal ne doit pas être supérieur à 10 fois l'épaisseur du mur ni supérieur à $64t^2/h$, avec h est la hauteur, t est l'épaisseur du mur

Quant aux sites d'implantation des constructions en terre :

- Il faut s'assurer que le site d'implantation de la nouvelle construction n'est pas traversé par une faille reconnue active (mouvements différentiels en surface). Au cas où une faille serait reconnue active il n'est pas permis ni de construire sur la faille ni dans une bande de 200 m de largeur de part et d'autre de son tracé.
- Il n'est pas permis de construire sur un versant présentant un risque d'instabilité par glissement.
- Les constructions en terre sont recommandées sur des sites présentant des pentes maximales de 35% (inclinaison inférieure à 20°) qui ne présentent pas d'effet d'amplification topographique important.
- Les constructions en terre construites sur des sites présentant des pentes supérieures à 35% doivent être réalisées en blocs disposés en terrasses. Les constructions sur un site en pente, réalisée en un seul bloc ayant les fondations situées à différents niveaux ne sont pas tolérées dans les zones sismiques 4, 3 et 2.
- La construction en terre ne doit pas être fondée sur un sol sableux et lâche, sols argileux mou ou gonflants, sols meubles ou mal compactés, sols marécageux et instables
- Les constructions en terre ne doivent pas être érigées sur des sites exposés aux inondations, au glissement de terrain ou présentant des sols géologiquement instables.

3. Impacts du changement climatique et adaptation

3.1 Les défis des changements climatiques

Les changements climatiques représentent une menace sérieuse pour l'Agdal du Haut Atlas. Les extrêmes de chaleur et de froid perturbent les cycles naturels et affectent directement la biodiversité et les moyens de subsistance des populations locales. Les périodes de sécheresse prolongées réduisent les ressources en eau, essentielles pour l'agriculture et l'élevage. À l'inverse, les épisodes de froid intense peuvent dévaster les cultures et le bétail, mettant en péril la sécurité alimentaire des communautés.

Les variations climatiques exacerbent également les phénomènes d'érosion des sols et de désertification, menaçant la stabilité de l'écosystème. Les pratiques traditionnelles de gestion des ressources, bien que résilientes, peinent parfois à s'adapter à ces nouvelles conditions. L'accroissement de la migration des jeunes vers les zones urbaines, à la recherche de meilleures opportunités économiques, fragilise encore davantage les structures communautaires et la transmission des savoirs traditionnels.

Le changement climatique est l'un des défis sociétaux et environnementaux les plus complexes de notre siècle et le Maroc n'est pas à l'abri de ses effets, notamment le froid et la chaleur. Ainsi, la problématique énergétique est au centre des discussions des différents acteurs,

Vu l'importance des enjeux sociaux, économiques et environnementaux que la problématique énergétique engage pour l'architecture durable capable de résister à des conditions climatiques plus extrêmes, très froid pendant l'hiver et très chaud pendant l'été, dans la région Draa-Tafilalet et le Haut Atlas y compris les Agdals, nous allons nous focaliser sur les températures extrêmes et l'effet thermique dans les ambiances des constructions en terre et en pierre, et qui impactent considérablement le confort thermique à l'intérieur des ambiances et peuvent faire augmenter les dépenses énergétiques de chauffage en hiver et de refroidissement en été.

3.2 Vers une adaptation durable

Pour préserver l'Agdal du Haut Atlas et ses valeurs patrimoniales face aux défis climatiques, des actions concertées et durables sont nécessaires. La mise en place de programmes de conservation de la biodiversité, soutenus par des initiatives locales et internationales, peut aider à protéger les espèces endémiques et les habitats naturels. Le renforcement des capacités des communautés locales à travers des formations sur les pratiques agricoles résilientes et la gestion durable des ressources est également crucial.

La valorisation des savoirs traditionnels et de la culture Amazighe, en intégrant les connaissances locales dans les politiques de développement, peut contribuer à une meilleure adaptation aux changements climatiques. La promotion de l'éco-tourisme, basé sur le respect de l'environnement et des cultures locales, offre une voie pour diversifier les sources de revenus tout en sensibilisant le public à l'importance de préserver ce patrimoine unique.

3.3 Analyse bioclimatique de chaque site et du cadre bâti en terre et en pierre

Concernant le cadre bâti du patrimoine architectural, il doit composer avec le climat et les ressources locales, tout en respectant les principes de l'architecture bioclimatique et la réglementation thermique lors de sa conception ou réhabilitation culturelle. Celle-ci doit satisfaire deux exigences incontournables pour atteindre les objectifs de l'efficacité énergétique du bâtiment: réduction des consommations énergétiques et amélioration du confort thermique.

Nous essayons d'abord l'approche bioclimatique à travers les données climatiques mensuelles (variations de la température moyenne maximale et minimale, de l'humidité relative moyenne maximale et minimale, des précipitations moyennes et de la direction des vents dominants) de la station la plus proche caractérisée par sa position géographique (longitude, latitude et altitude). L'étude climatique permet de tracer le Diagramme Bioclimatique ou Diagramme Psychrométrique de Szokolay⁴ (Figures 13a et 13b). C'est un outil d'aide à la décision globale du projet bioclimatique permettant d'établir le degré de nécessité de mise en œuvre de grandes options pour maintenir un confort thermique de l'ambiance.

Le diagramme de Szokolay précise les limites moyennes du confort entre 19,5°C et 25,5°C avec une moyenne de 40% d'humidité relative en zone froide et 21°C et 27°C avec une moyenne de 35% d'humidité relative en zone chaude.

Le diagramme de Szokolay recommande pour les sites et les ambiances intérieures:

i) en zone froide:

- Une forte inertie thermique pour l'été ;
- Le chauffage passif à travers les apports internes pour les mois d'octobre, avril et mai ;
- Le chauffage actif pour la saison d'hiver et les mois assez froids comme novembre et mars.

ii) en zone chaude:

- Ventilation naturelle avec déshumidification spécialement pour le mois de septembre ;
- Forte inertie thermique avec ventilation nocturne pendant l'été ;
- Le chauffage passif à travers les apports internes pour les mois assez froids ;
- Le chauffage actif pendant la nuit pour la saison d'hiver.

L'approche bioclimatique basée sur le diagramme de Szokolay est complétée par l'utilisation des tables de Mahoney⁵ destinées à récapituler et à analyser les données climatiques du lieu, pour formuler et hiérarchiser des recommandations pour les ambiances. Ces tables sont considérées comme étant un outil simple d'aide à la conception architecturale bioclimatique, et qui permet d'avoir les premières recommandations qualitatives en termes de dispositions architecturales, notamment des indications simples sur le plan masse, la forme du bâtiment, les orientations, l'inertie de la toiture et des murs externes et internes, la taille et le pourcentage des ouvertures par rapport à la surface des façades.

⁴ Szokolay S. V., *Introduction to Architectural Science. The Basis of Sustainable Design*. Architectural Press, 2008.

⁵ Carl Mahoney, professeur en architecture, est à la base d'un plan d'action de l'architecture bioclimatique dans les pays en développement ; <http://cma.alphalink.com.au/>

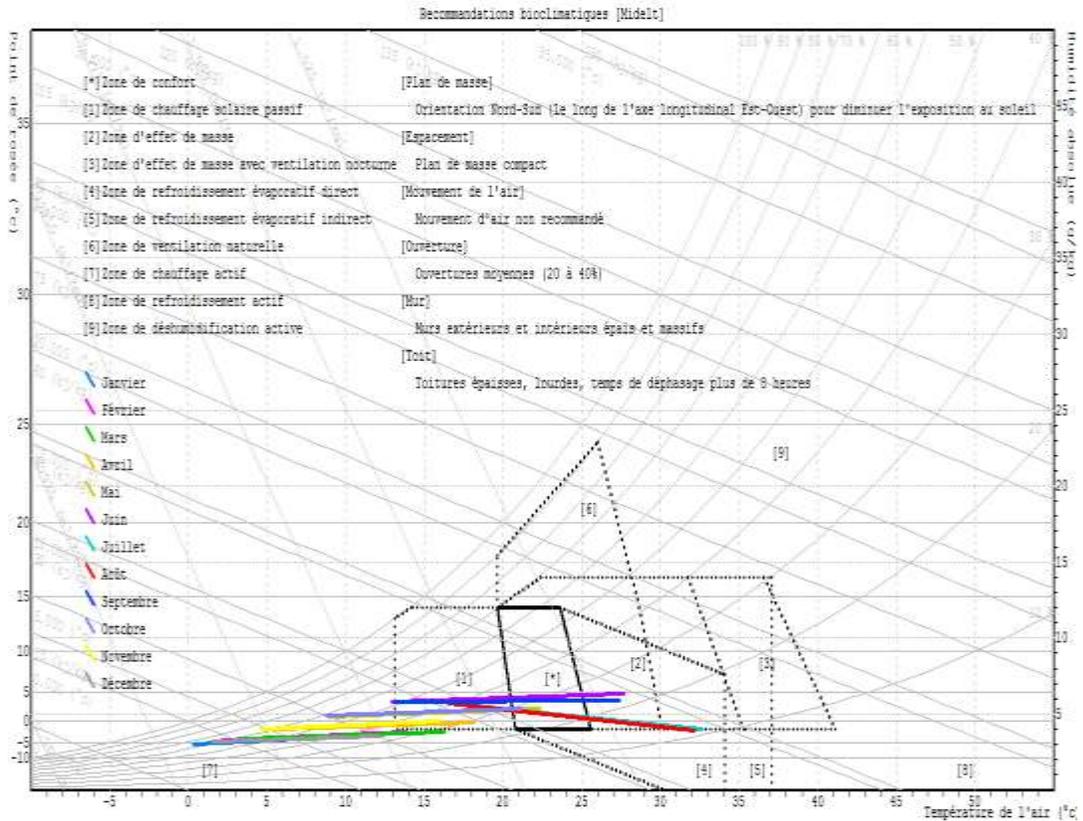


Figure 13a : Diagramme bioclimatique de Szokolay pour climat froid
(Source: Awrash)

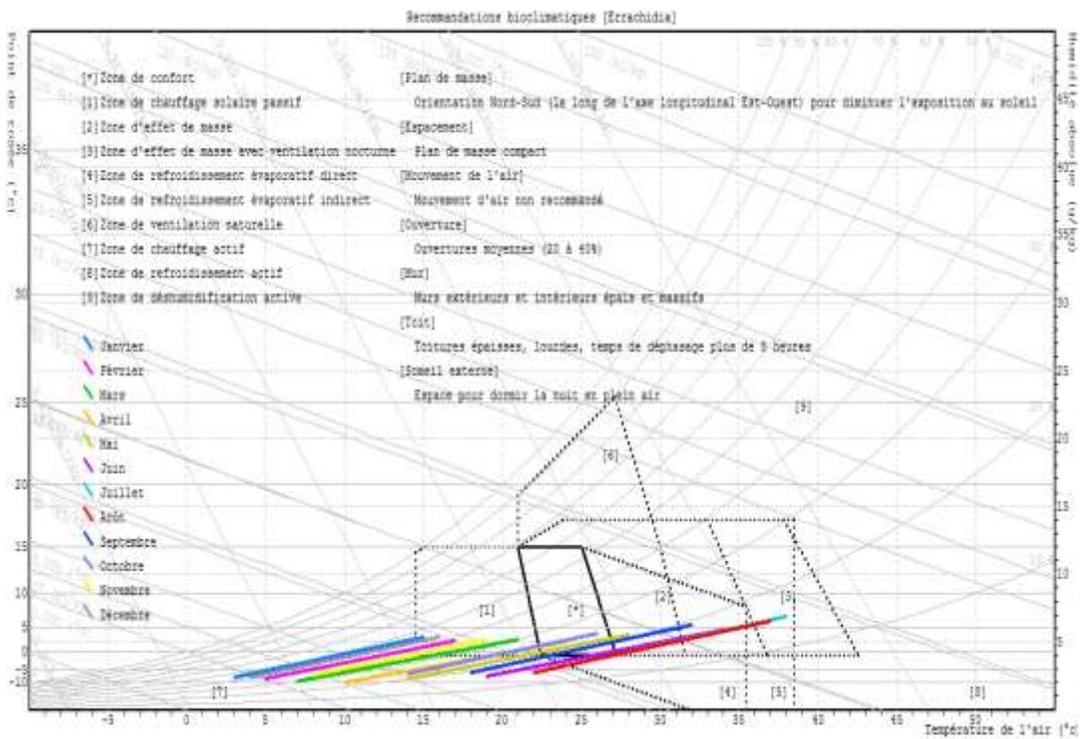


Figure 13b : Diagramme bioclimatique de Szokolay pour climat chaud
(Source: Awrash)

- i) Recommandations des tables de Mahoney en zone froide :
- Plan de masse compact avec orientation nord-sud (le long de l'axe longitudinal est-ouest) ;
 - E spacements entre bâtiments : Plan de masse compact ;
 - Ouvertures : Ouvertures moyennes (20 à 40%) ;
 - Murs : Murs extérieurs et intérieurs épais, massifs, temps de déphasage plus de 8h ;
 - Toitures : Toitures épaisses, lourdes, temps de déphasage plus de 8h.
- ii) Recommandations des tables de Mahoney en zone chaude :
- Plan de masse compact avec cour intérieure ;
 - Ouvertures moyennes (20 à 40 %) ;
 - Murs et planchers épais et massifs avec temps de déphasage plus de 8 h ;
 - Toitures épaisses et massives avec temps de déphasage plus de 8 h ;
 - Espace pour dormir la nuit en plein air.

Rappelons que la terre crue et la pierre possèdent une propriété thermique importante, l'inertie, car ces matériaux disposent des conditions nécessaires à son obtention : la capacité thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique.

A titre d'exemple, la capacité thermique ($510 \text{ W/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$ pour le pisé et $380 \text{ W/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$ pour l'adobe) exprime l'aptitude du matériau à emmagasiner de la chaleur par rapport à son volume. Plus elle est importante, plus la quantité de chaleur à lui apporter pour augmenter sa température est élevée, ce qui permet de réduire l'amplitude des températures.

Grâce à la faible diffusivité thermique (vitesse de transmission de la chaleur, exprimant par conséquent le temps de déphasage thermique à travers la paroi⁶ : plus elle est faible, plus la chaleur met du temps à traverser l'épaisseur du matériau), de l'ordre de $2,53 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ pour la terre crue et $5 \text{ à } 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ pour la pierre. La terre et la pierre offrent l'avantage d'un amortissement et d'un déphasage important des variations et des apports thermiques externes. Enfin, son effusivité thermique (rapidité avec laquelle un matériau absorbe les calories) est élevée, ce qui contribue à sa capacité de régulation de température.

3.4 Conception adaptée au climat et innovations en matériaux

Les dispositions réglementaires Marocaines (Règlement Thermique des Constructions au Maroc, RTCM) de l'efficacité énergétique du bâtiment se basent, entre autres, sur les performances de l'enveloppe des bâtiments suivant le zonage climatique (Figure 14) du territoire marocain. Nous allons nous focaliser sur le cadre bâti construit avec les matériaux traditionnels à base de terre, de bois et de pierre, et voir dans quelle mesure nous pourrions améliorer l'enveloppe du bâti pour

⁶ Le déphasage thermique d'un matériau ou d'une paroi joue un grand rôle pour le confort thermique d'été d'un bâtiment. Il représente la durée entre le moment où la température est la plus élevée à l'extérieur et celui où elle est la plus élevée à l'intérieur. C'est le temps qu'il faut à la chaleur pour pénétrer à l'intérieur de l'habitat. Cela permet souvent de ne pas utiliser de climatisation particulièrement coûteuse. Il est fonction de l'épaisseur ainsi que de la conductivité thermique des matériaux. Il dépend donc de la vitesse de diffusion de la chaleur au travers de la paroi constituée par le matériau ou les matériaux:

La diffusivité $a = \lambda / (\rho \cdot C)$ (m^2/heures) et le temps de déphasage $= 1,38 e \sqrt{a}$ (heures) avec ρ : masse volumique du matériau (kg/m^3), C : capacité thermique massique du matériau ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$), λ : Conductivité thermique du matériau ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$), e : épaisseur de la paroi (m). Relation de base : $1 \text{ KWh} = 3600 \text{ KJ}$. Exemple, le pisé de 40 cm d'épaisseur possède un déphase thermique d'environ 12 h.

confirmer davantage les objectifs évoqués : améliorer le confort thermique et réduire les déperditions calorifiques à travers les parois de l'enveloppe traditionnelle (murs, toiture, vitrage, plancher bas sol).

Zonage climatique du Maroc adapté au Règlement Thermique de Construction au Maroc

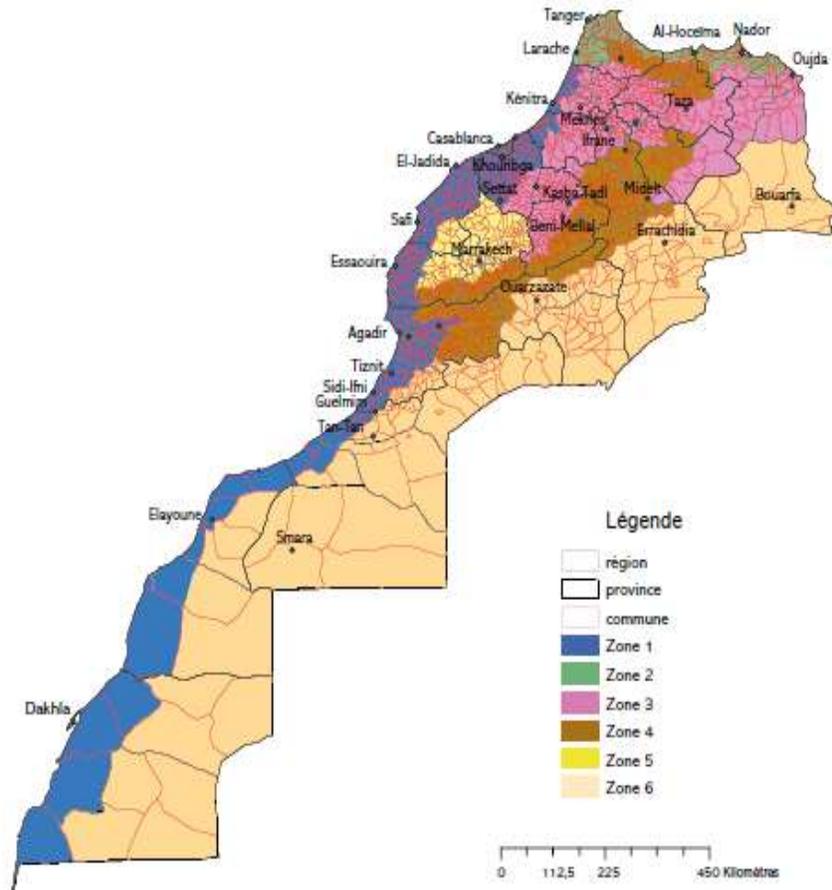
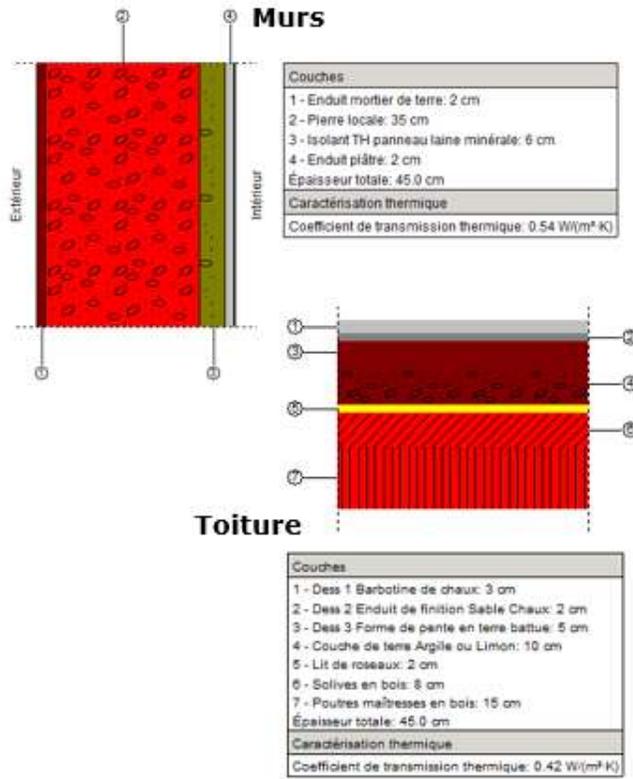


Figure 14 : Zonage climatique du Maroc (Source : RTCM)

Nous proposons ici une conception technique adaptée au climat et conforme à la réglementation thermique selon le RTCM ; les configurations des éléments de construction comprenant les épaisseurs des différentes couches de matériaux (Figures 15a et 15b) semblent respecter la réglementation thermique de l'enveloppe normale d'un cadre bâti traditionnel à base de terre en zone chaude et de pierre en zone froide dans le Haut Atlas. L'approche consiste à fixer les spécifications techniques exprimées, pour chaque type de bâtiment et chaque zone climatique, sous forme de coefficients maximaux de transmission thermique (valeurs U exprimées en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ⁷) qui restent inférieures aux seuils donnés par la réglementation.

⁷ Qualité thermique bonne : U entre 0.5 et 0.8 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$; très bonne : U entre 0.3 et 0.5. $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.



Référence	Coefficient de transmission thermique	Conforme
Mur Ext	0.55 W/m²K	✓

Valeur limite réglementaire	
Zone climatique	Zone 4
Usage du bâtiment	Résidentiel
Taux global des baies vitrées (%)	19.0
Coefficient de transmission thermique (W/m²K)	0.60

Valeur de U pour les murs et la toiture

Référence	Coefficient de transmission thermique	Conforme
Toiture terrasse	0.42 W/m²K	✓

Valeur limite réglementaire	
Zone climatique	Zone 4
Usage du bâtiment	Résidentiel
Taux global des baies vitrées (%)	19.0
Coefficient de transmission thermique (W/m²K)	0.55

Figure 15a : Résultats de conformité à la réglementation thermique en zone froide dans le Haut Atlas

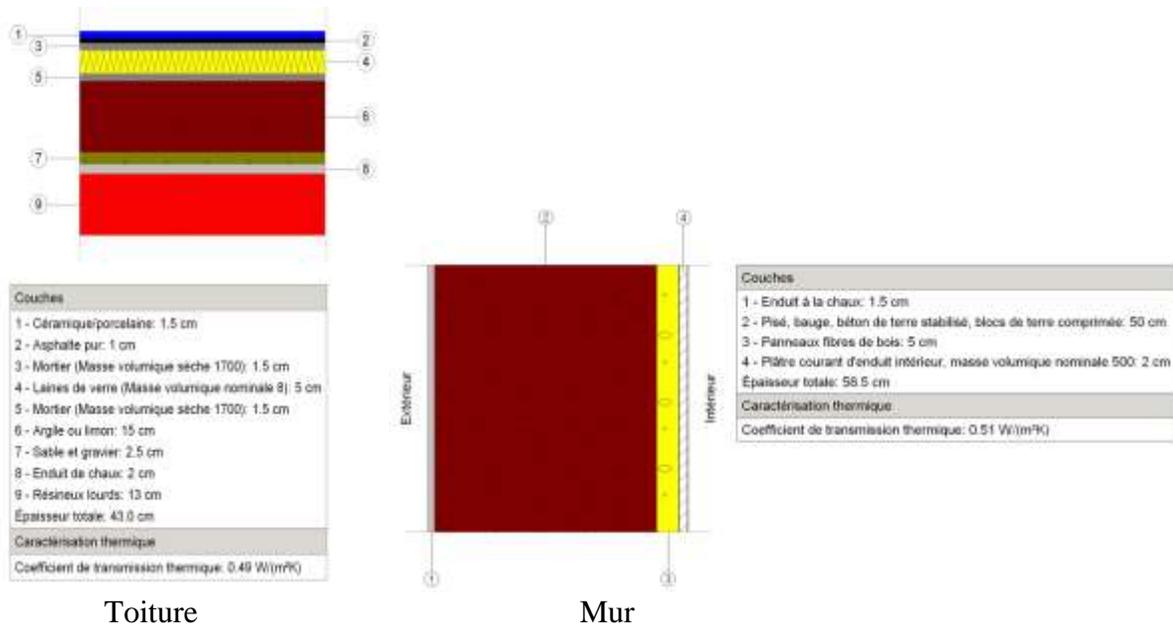


Figure 15b : Résultats de conformité à la réglementation thermique en zone chaude

Conclusion

L'Agdal du Haut Atlas est un joyau de patrimoine naturel, social et culturel, dont la préservation est essentielle face aux défis posés par les changements climatiques. La résilience de cet écosystème et des communautés Amazighes dépend de notre capacité collective à soutenir des pratiques durables et à valoriser les richesses culturelles et naturelles de cette région.

En intégrant les considérations climatiques dans les efforts de conservation du patrimoine, en impliquant les communautés locales, en promouvant l'innovation et en plaidant en faveur de politiques favorables, les Villages de l'architecture en terre et en pierre peuvent être mieux équipés pour faire face aux défis posés par le changement climatique et continuer à jouer leurs rôles culturels, sociaux et économiques pour les générations futures.

La recherche sur des matériaux alliant propriétés traditionnelles et durabilité accrue peut offrir de nouvelles solutions pour préserver le patrimoine architectural. Les blocs de terre stabilisés et les traitements avancés des pierres peuvent offrir une résistance accrue aux facteurs de stress environnementaux.

Références

Auclair L., Simenel R., Alifriqui M., Michon G., '«Agdal», Les Voies Imazighen de la Patrimonialisation du Territoire', Hesperis-Tamuda, Vol. Xlv, pp. 129-149, 2010.

Cheikhi W., L'efficacité énergétique appliquée aux méthodes constructives traditionnelles: Vers la mise en place d'un guide d'architecture bioclimatique en pisé, Thèse de doctorat, Sciences et Techniques pour l'Ingénieur, Université Mohammed V – Rabat, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Maroc, 2019.

El Harrouni K., Le patrimoine bâti au Maroc. Vulnérabilité, sauvegarde et requalification. Editions Universitaires Européennes. Copyright © 2019 International Book Market Service Ltd, OmniScriptum Publishing Group, Beau Bassin -Rose Hille, Morice, 2019, ISBN: 978-613-8-49837-7.

El Harrouni K., Kharmich, H., & Karibi, K., 'L'architecture traditionnelle à base de terre comme outil de durabilité et moyen d'adaptation au changement climatique (chaleur et froid)'. African and Mediterranean Journal of Architecture and Urbanism, Vol 2, Issue 4, pp. 100-122, 2020.

El Harrouni K., Kharmich, H., & Karibi, K., 'Traditional Earth Architecture as a Tool for Sustainability and Adaptation to Climate Change of Heat and Cold Extremes', Materials Research Proceedings, Vol. 40, pp 218-225, 2024 DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644903117-23>

Givoni B., L'homme, l'Architecture et le Climat.Éditions du Moniteur, Paris, 1978.

Kharmich H., El Harrouni K., 'Risques d'Inondations et Résilience Urbaine dans un Contexte de Changement Climatique. Cas de la Ville Marocaine, in Résilience, Vulnérabilité des Territoires et Génie Urbain', Auteurs : Bernard Landau, Youssef Diab, ISBN 9782859785048, Presses des Ponts, 2016.

Lamrani M., Etude du comportement thermique des matériaux locaux (Caractérisation et modélisation), Thèse de doctorat, Sciences et Techniques pour l'Ingénieur, Université Mohammed V – Rabat, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Maroc, 2018.

Royaume du Maroc, Bulletin Officiel, Décret N° 2-12-666 Approuvant le Règlement Parasismique pour les Constructions en Terre et Instituant le Comité National des Constructions en Terre, 2013.

Royaume du Maroc, Bulletin Officiel, Décret N° 2.13.874 Approuvant le Règlement Général de Construction Fixant les Règles de Performance Energétique des Constructions et Instituant le Comité National de l'Efficacité Energétique dans le Bâtiment, 6306, 4256-4269, 2014.

Szokolay S. V., Introduction to Architectural Science. The Basis of Sustainable Design. Architectural Press, 2008.