Symposium scientifique - Sous-Comité Méditerranée du CIVVIH-ICOMOS
Sinassos - Cappadoce - TURQUIE
5 - 6 septembre 2024

CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LES VILLES ET VILLAGES HISTORIQUES DE LA MÉDITERRANÉE

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

Khalid EL HARROUNI (*), Rime EL HARROUNI, Khadija OUKASSI

(*) Professeur titulaire, Chaire UNESCO "Education et Recherche en Urbanisme et Architecture Bioclimatiques Durables",
Directeur adjoint chargé de la Recherche à l'Ecole Nationale d'Architecture de Rabat, Maroc
Membre expert : ISCARSAH, ISCES et CIVVIH - ICOMOS - Isc
Editeur « African and Mediterranean Journal of Architecture and Urbanism »
https://revues.imist.ma/index.php?journal=AMJAU

Contenu :

1. Introduction

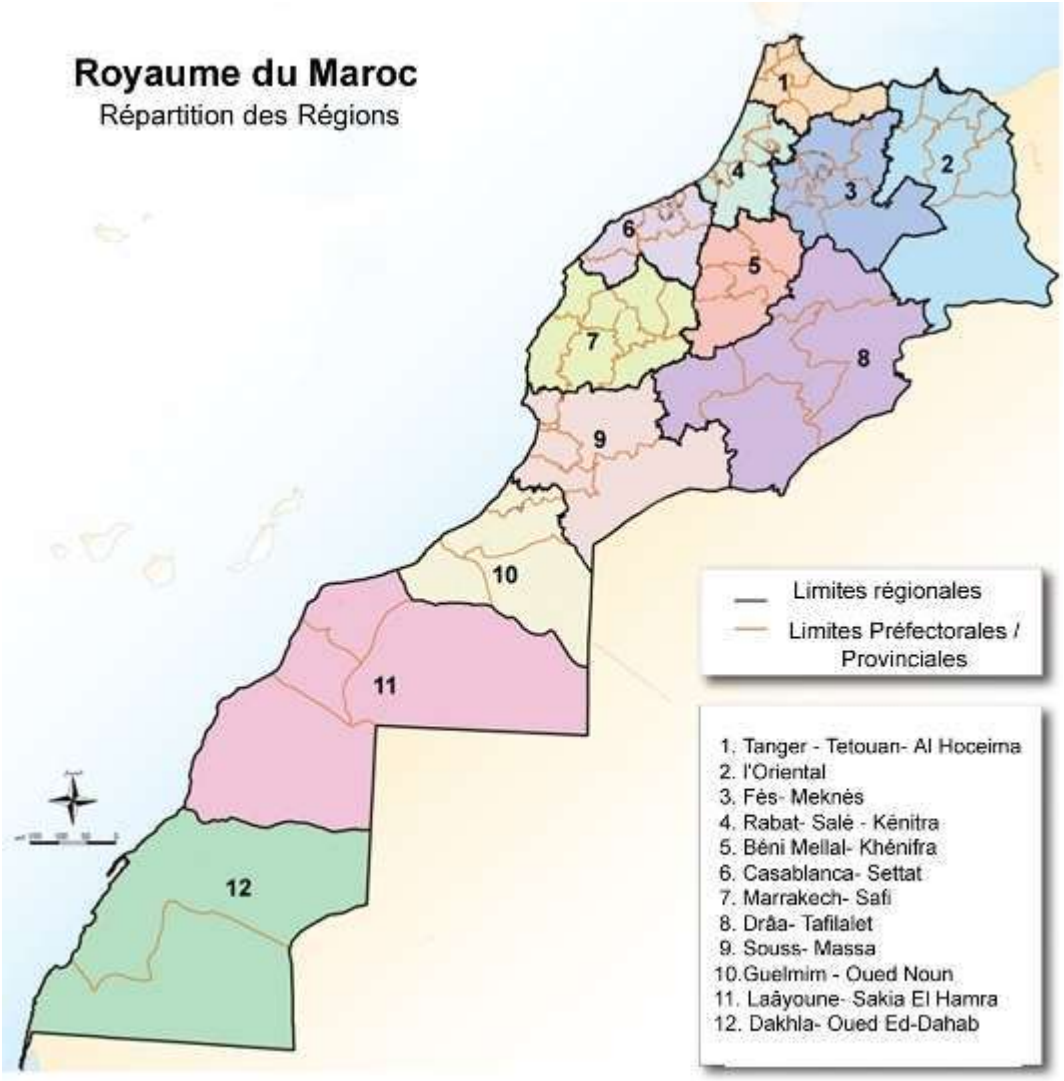
2. Vulnérabilité sismique de l'architecture en terre et en pierre & Retour sur le Séisme d'Al Haouz 8/09/2023

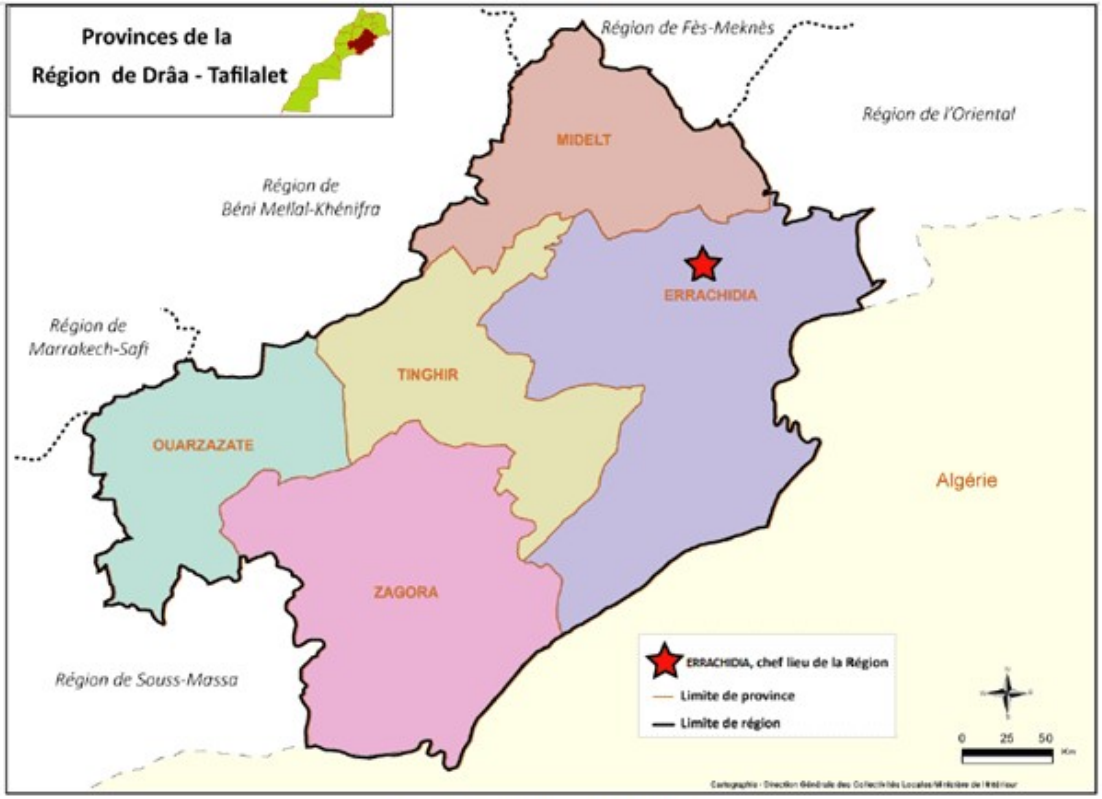
3. Impacts du changement climatique et adaptation

-Défis du CC & Analyse bioclimatique
-Conception adaptée au climat et innovations en matériaux

4-Conclusion

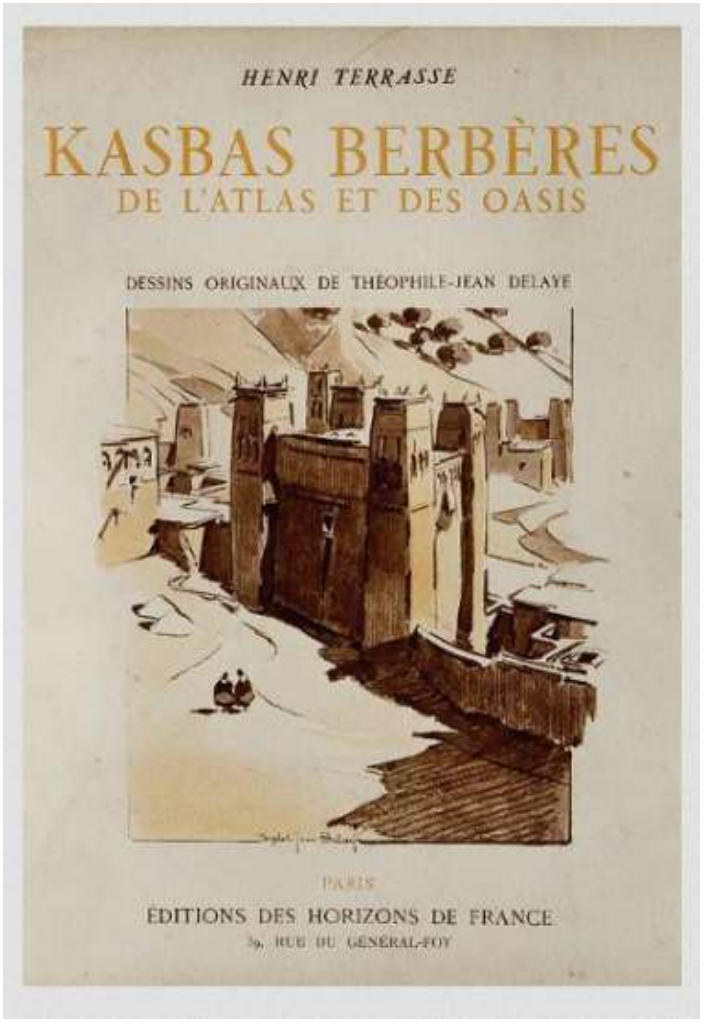
INTRODUCTION





Carte 1: Provinces de la Région

« Selon les règles d'un art militaire périmé et à la façon des portes monumentales des villes »

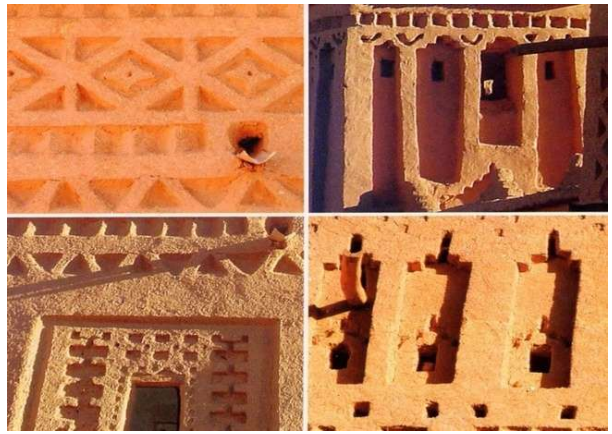


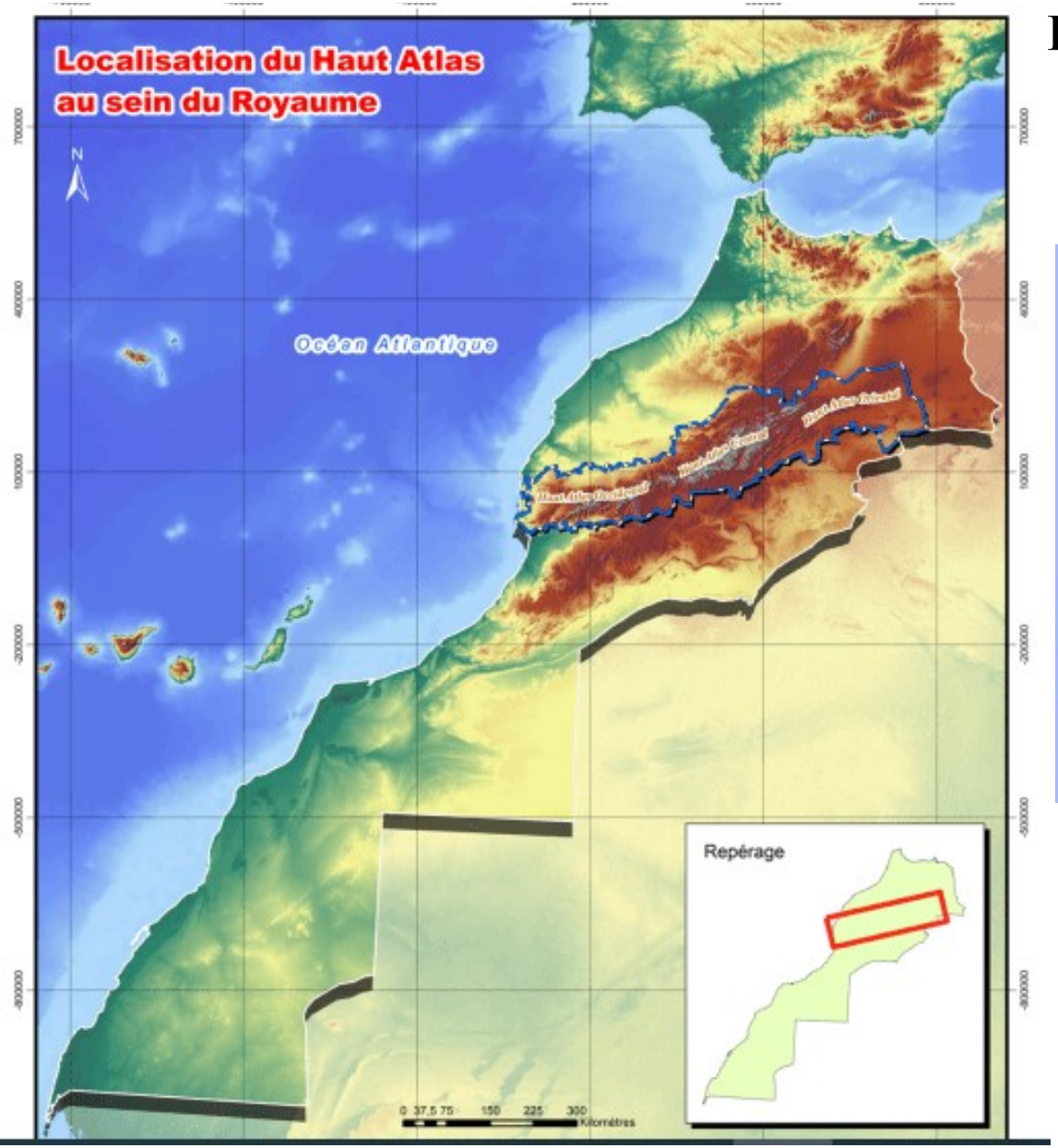
Terrasse H., Kasbas berbères de l'Atlas et des Oasis, Ed. des Horizons de France, Paris, 1938

Mosquée avec terrasse, Goulmima (2005)

Portes d'entrée des Haratines et des Imazighns
Ksar Ayt Yahya O'athmane

Ksar Ait Ben Haddou

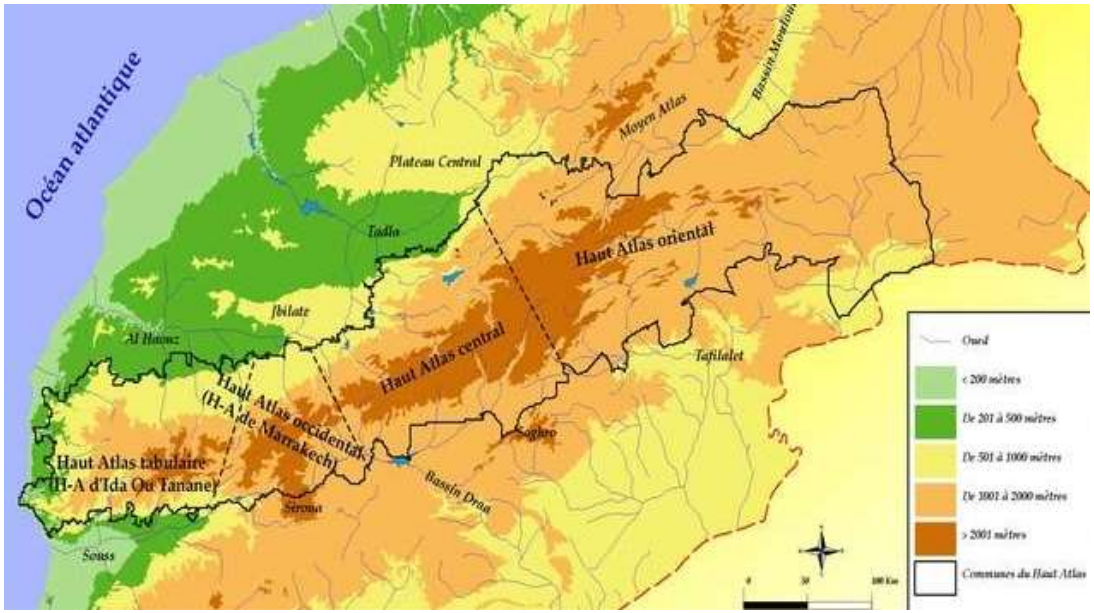




Le Haut Atlas

Aire Géographique et Climat

Aire Géographique



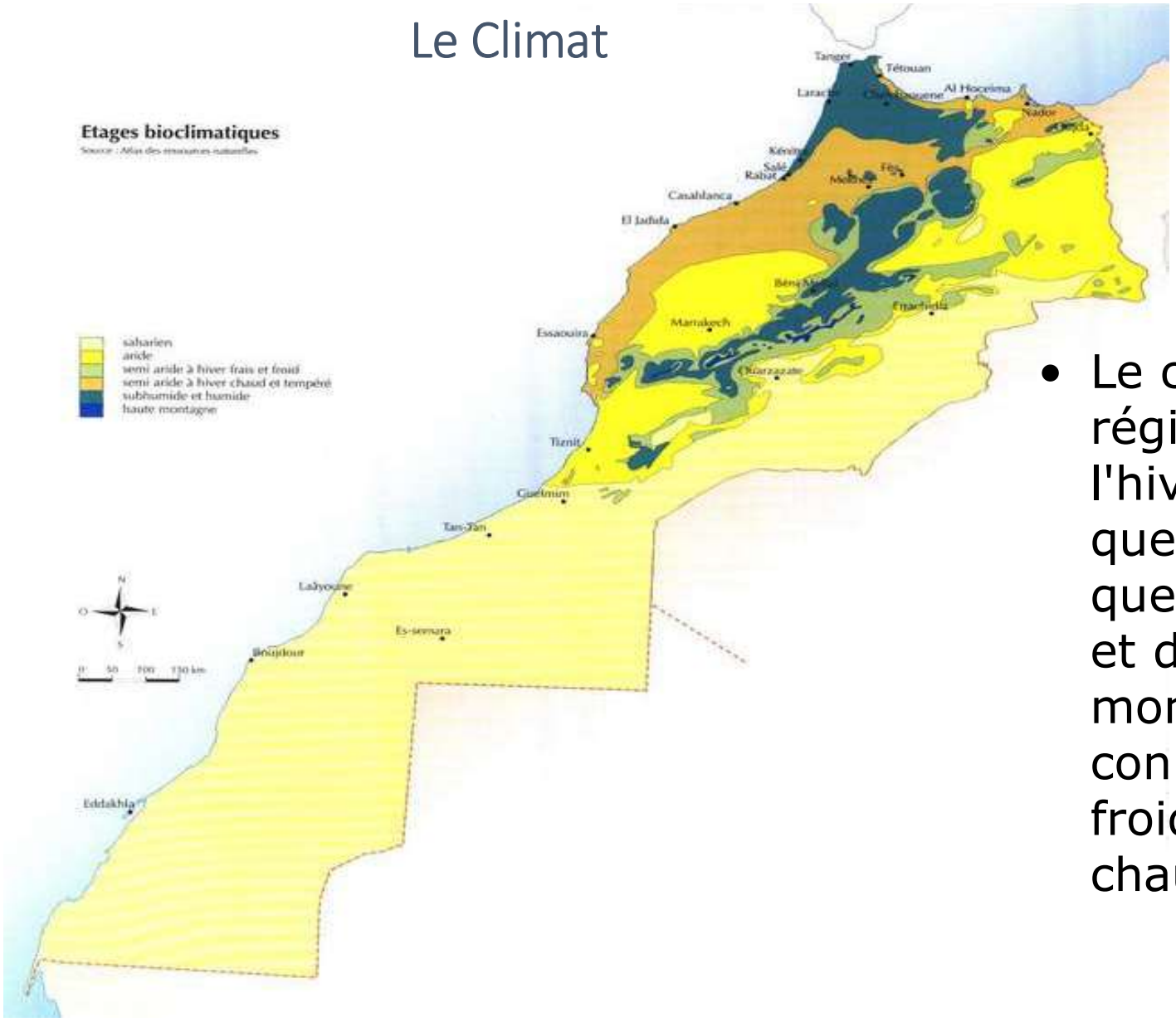
3 sous territories :

1. HA Oriental, 2. HA Central et 3. HA Occidental

Aire Administrative

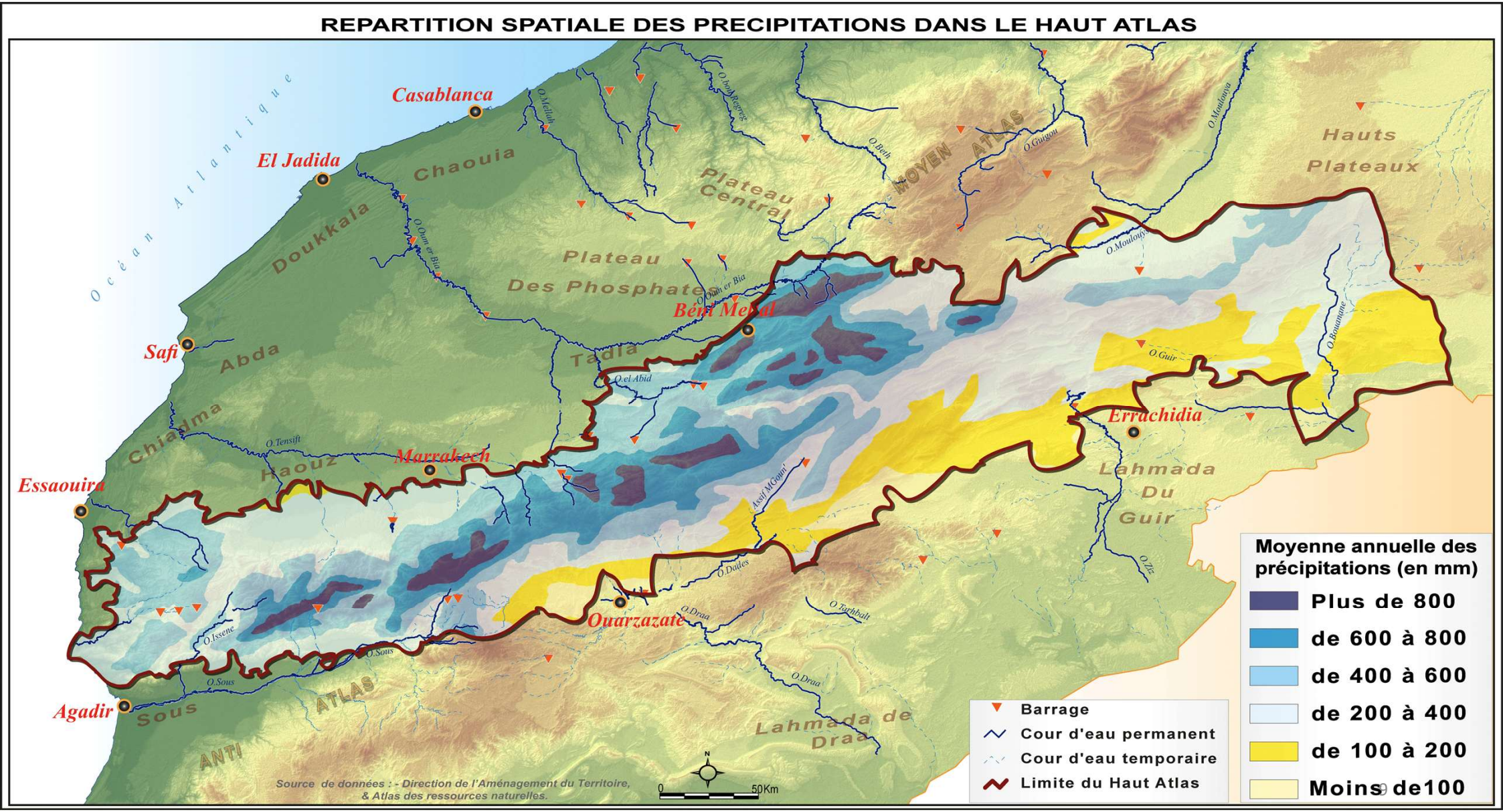
Provinces - Communes

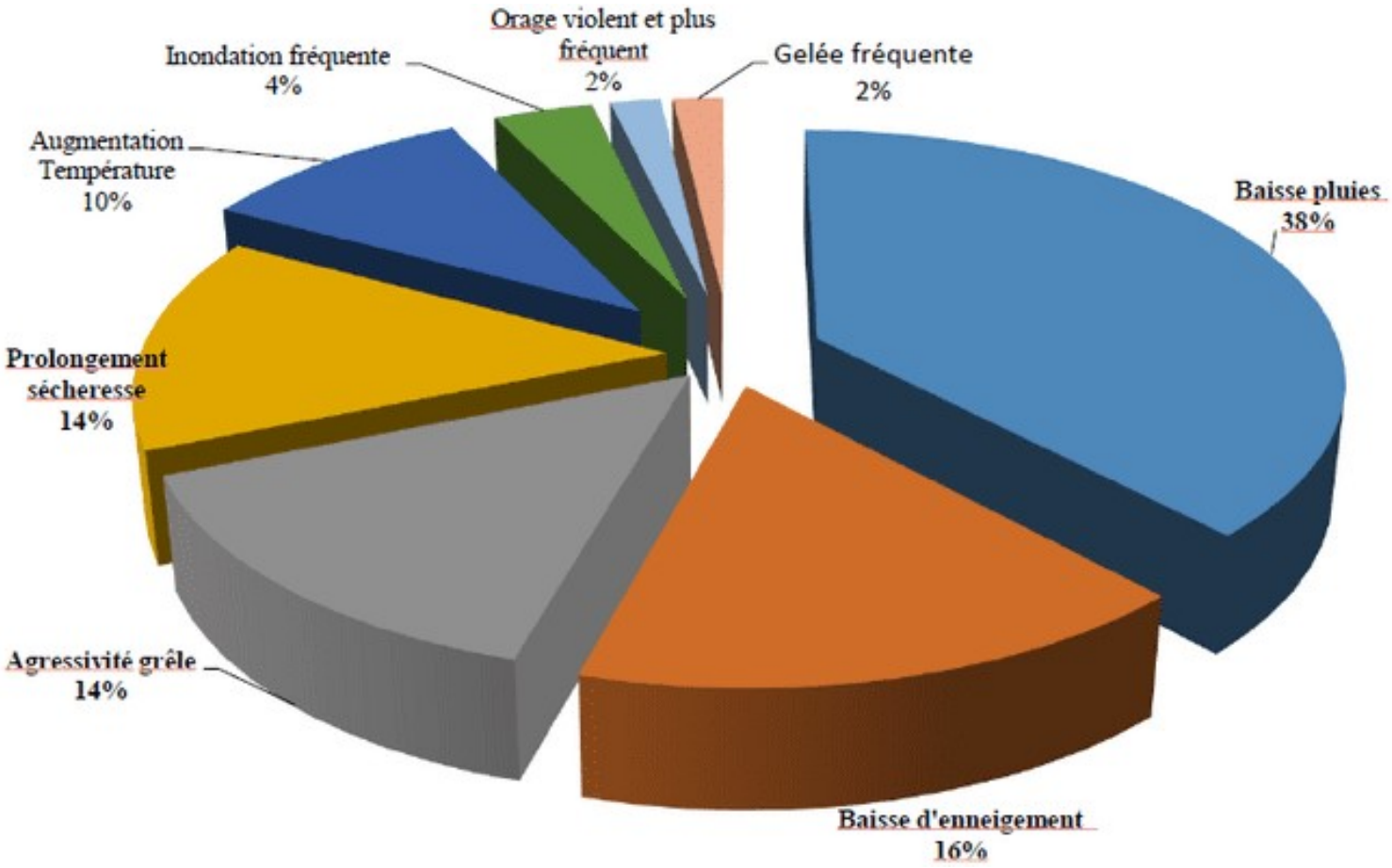
Le Climat



- Le climat varie selon les régions. Sur la côte, l'hiver est frais avec quelques pluies, tandis que l'été est ensoleillé et doux. Les massifs montagneux connaissent des hivers froids et des étés assez chauds et secs.

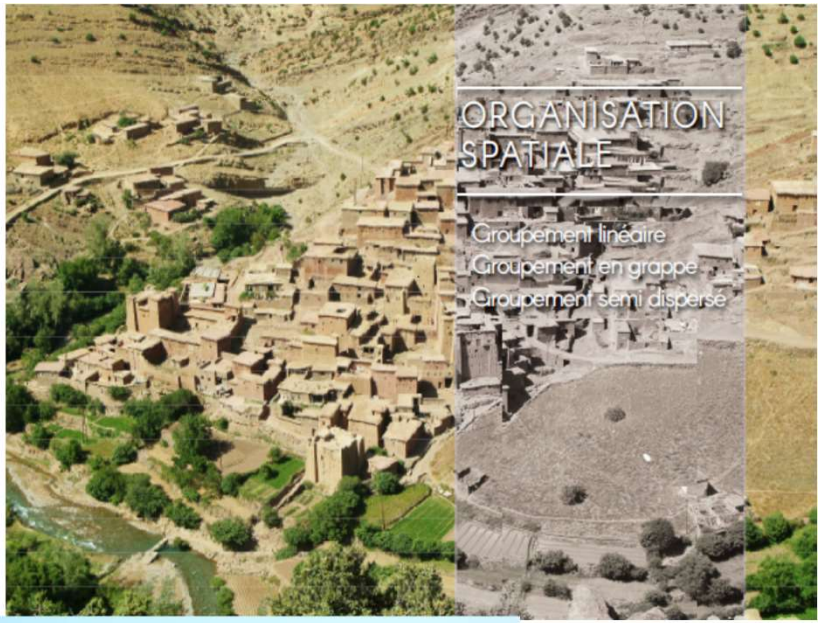
REPARTITION SPATIALE DES PRECIPITATIONS DANS LE HAUT ATLAS

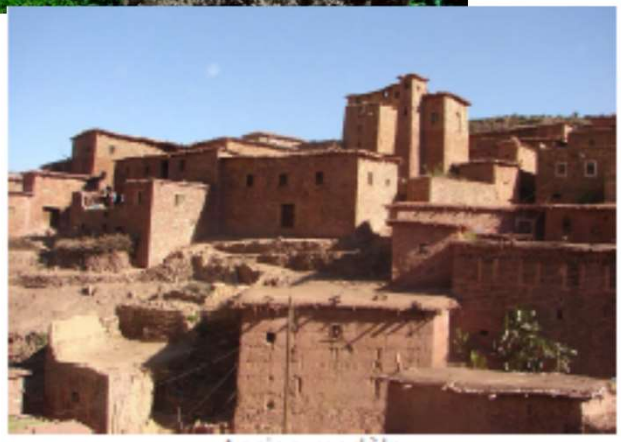


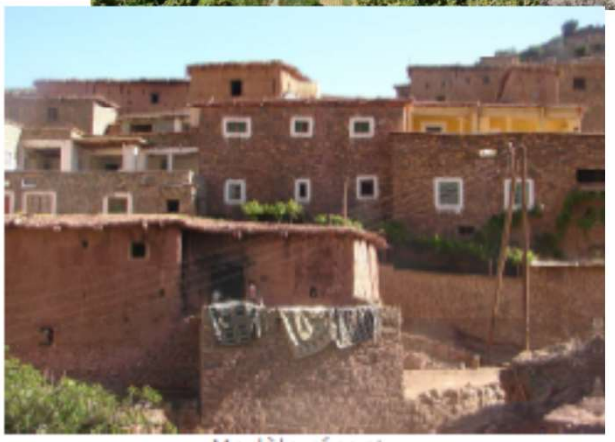


Changements perçus à Ait Bouguemaz, Haut Atlas

The Moroccan High Atlas entities: the territories and the human settlements (Agdal, Ighrem, Tighremt, Granary, etc.) as socio-ecological systems



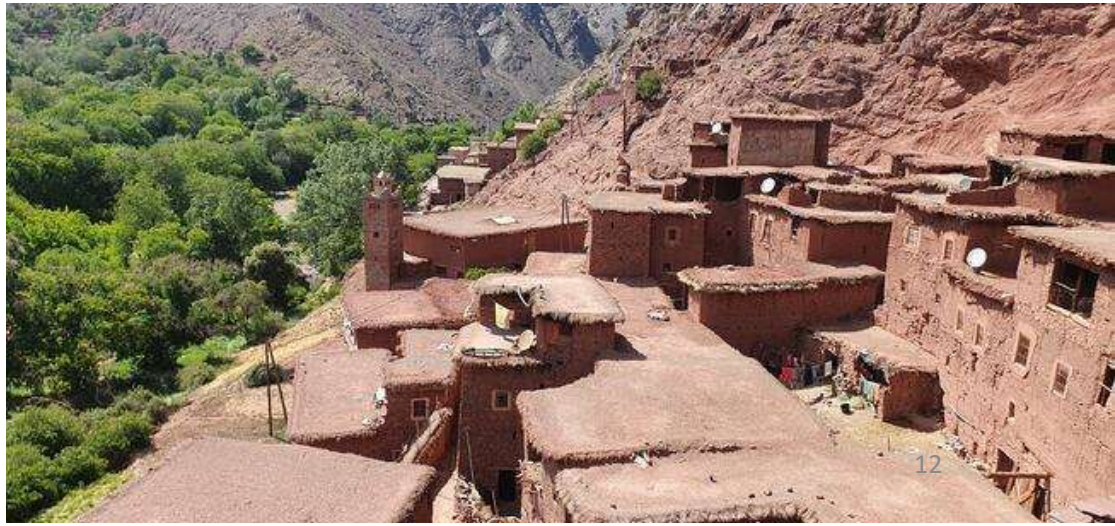

Ancien modèle


Modèle récent

Source: Charte architecturale du Haut Atlas Central, Agence Urbaine de Béni Mellal

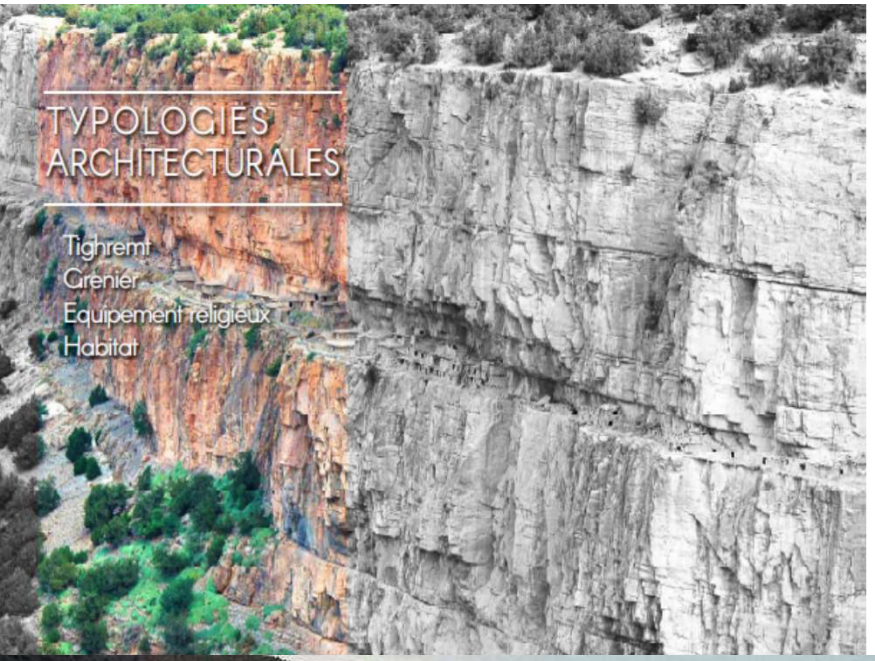
The Agdal

The Agdal in the Moroccan High Atlas refers to all areas in common property whose access and uses are regulated by a local group (village, tribal fraction, etc.). Agdal is a strictly delimited territory.
First, It is a spatial, geographical, and agroecological concept, characterized by a physical environment and specific biotic resources (trees, pastoral, agricultural resources, etc.)



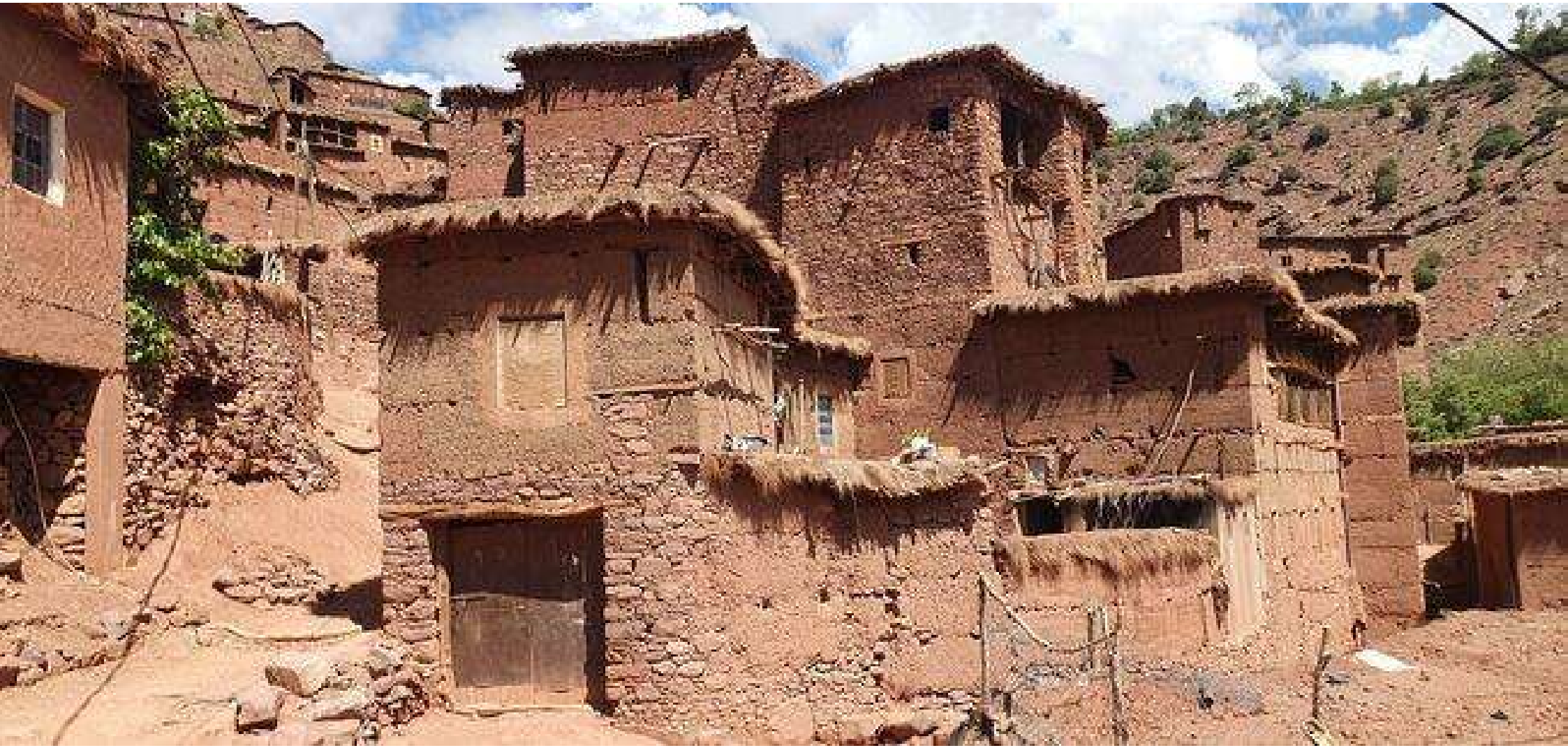
Source: Charte architecturale du Haut Atlas Central, Agence Urbaine de Béni Mellal

Architectural Typologies And Construction Materials



Architectural & Material Vernacular Construction Systems

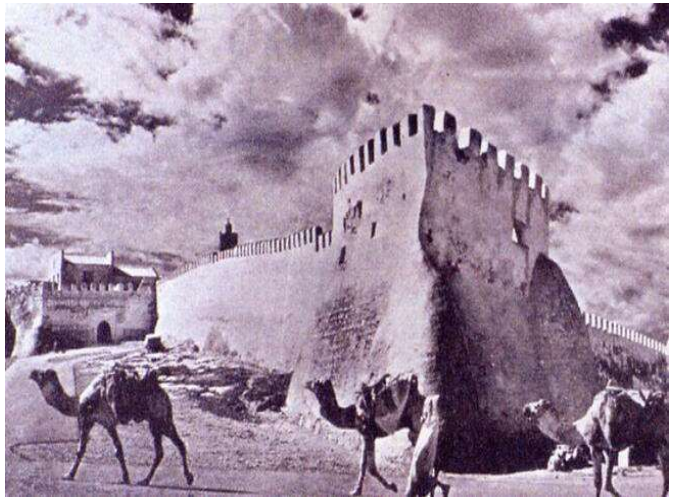
Architectural & Material Vernacular Construction in Villages



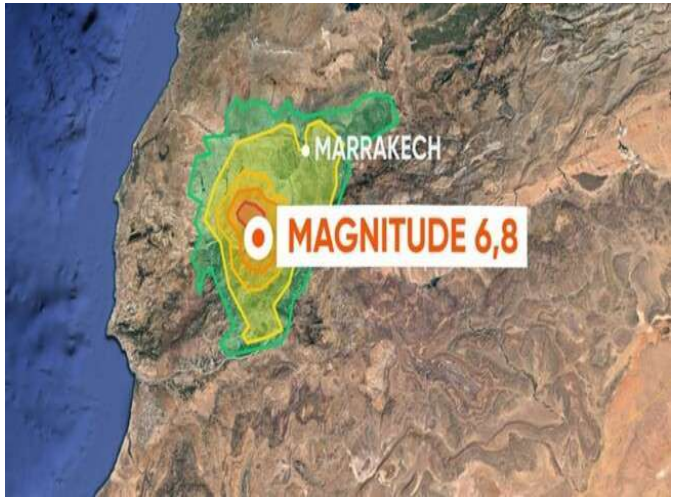
Architectural & Material Vernacular Construction Systems

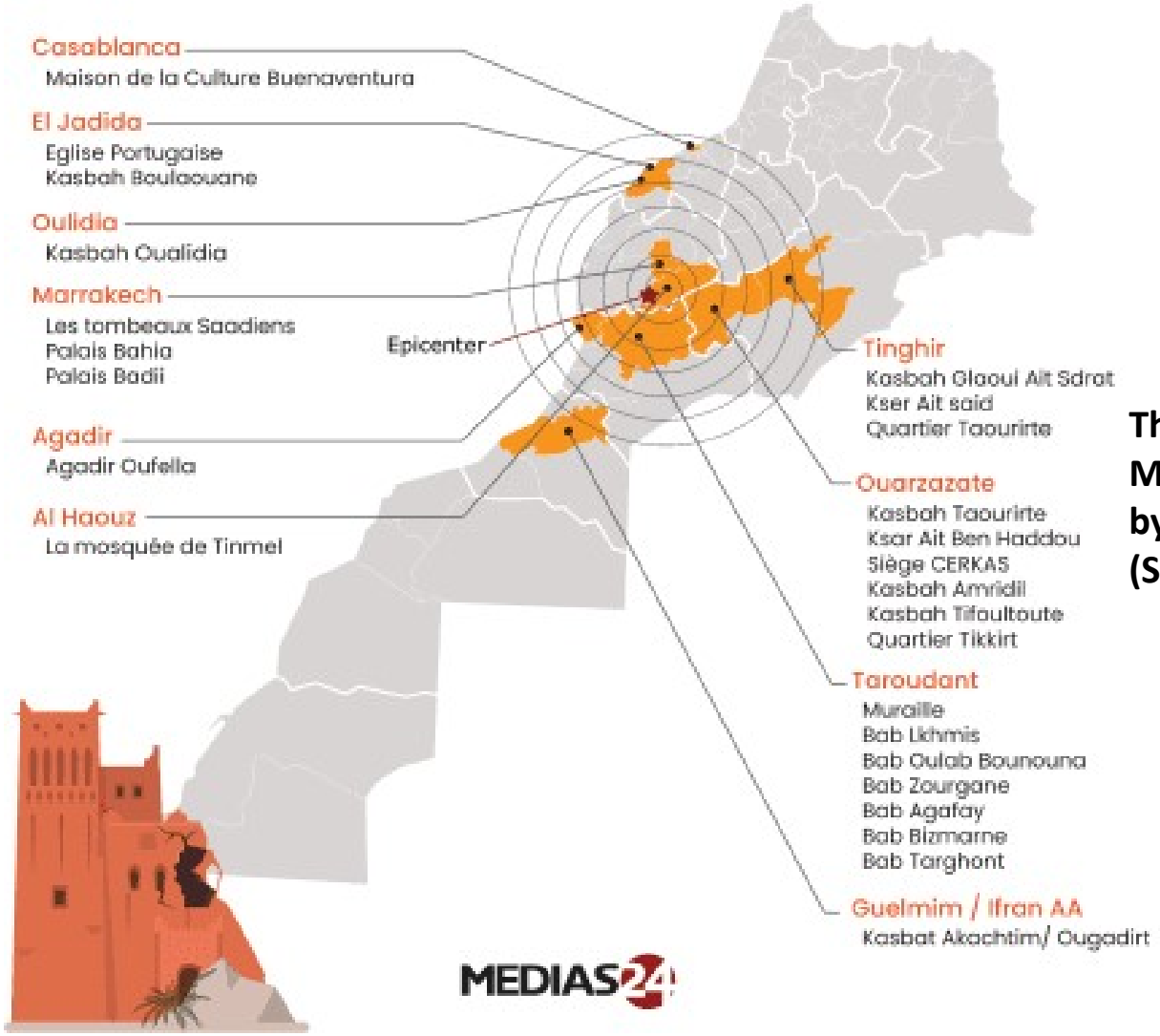
VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DE L'ARCHITECTURE EN TERRE ET EN PIERRE

Séisme d’Agadir, 1960

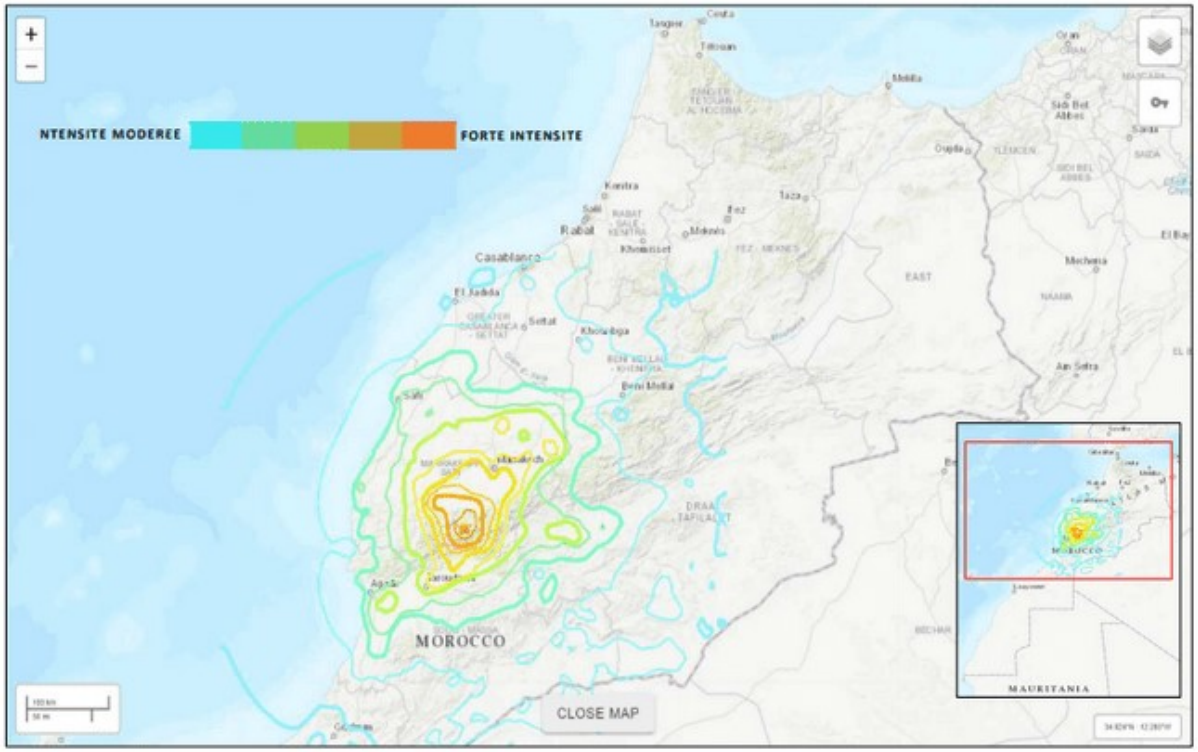


Séisme d’Al Haouz, 2023

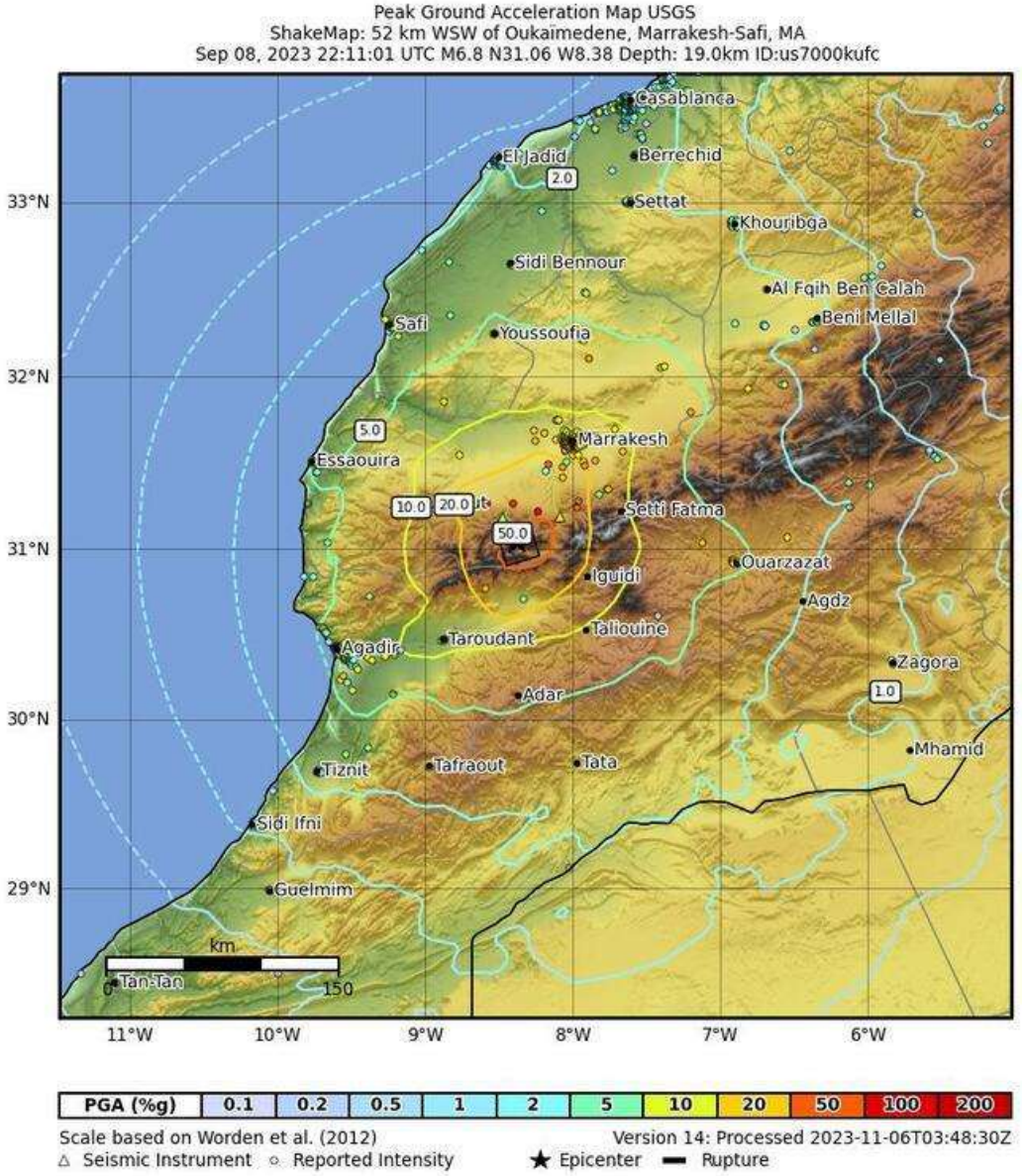




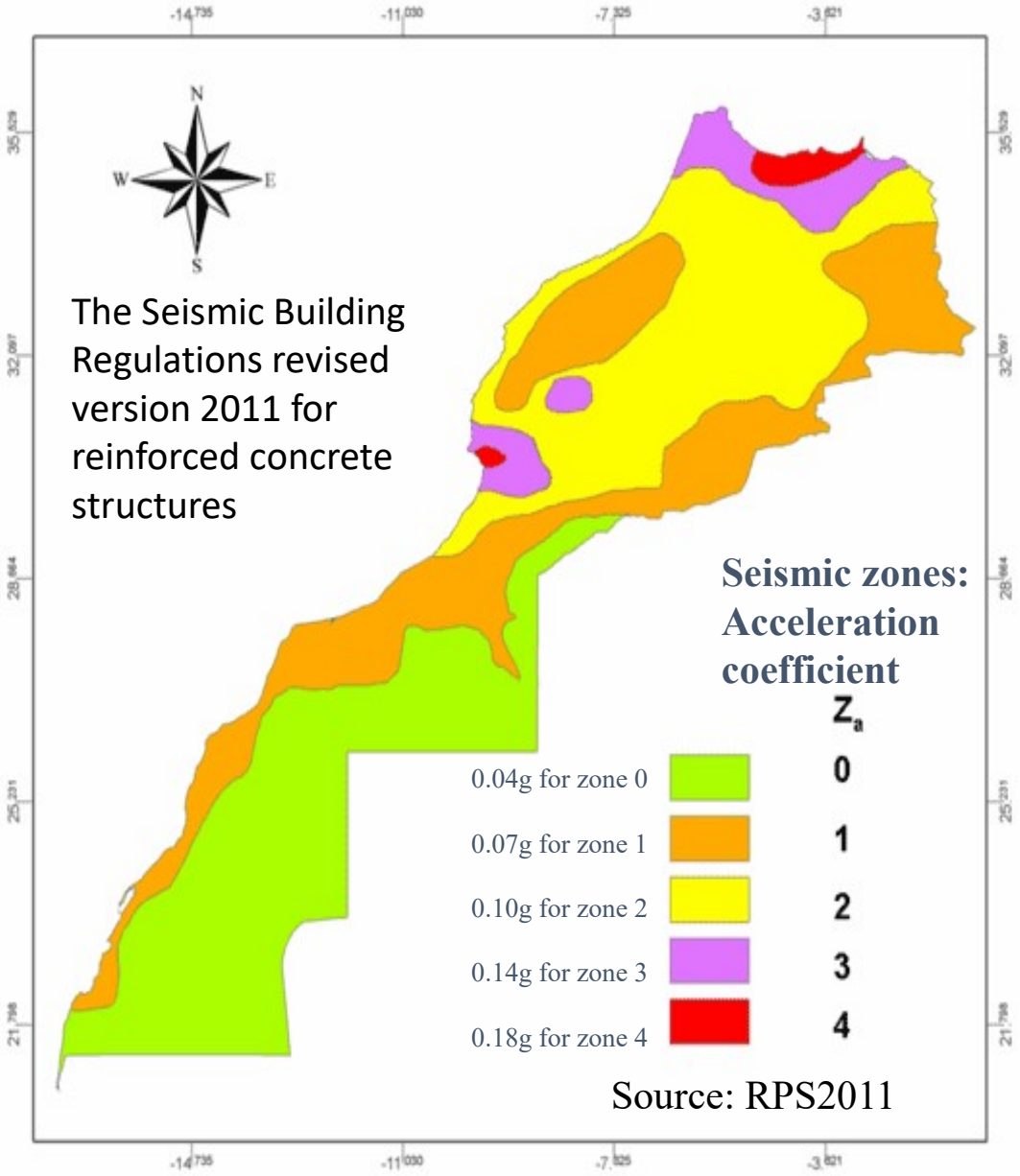
The location of 27 historical Monuments in 10 Provinces, affected by the earthquake (Source: Medias24, 2023, in French)



Intensity of the earthquake felt according to the Mercalli scale (according to USGS)

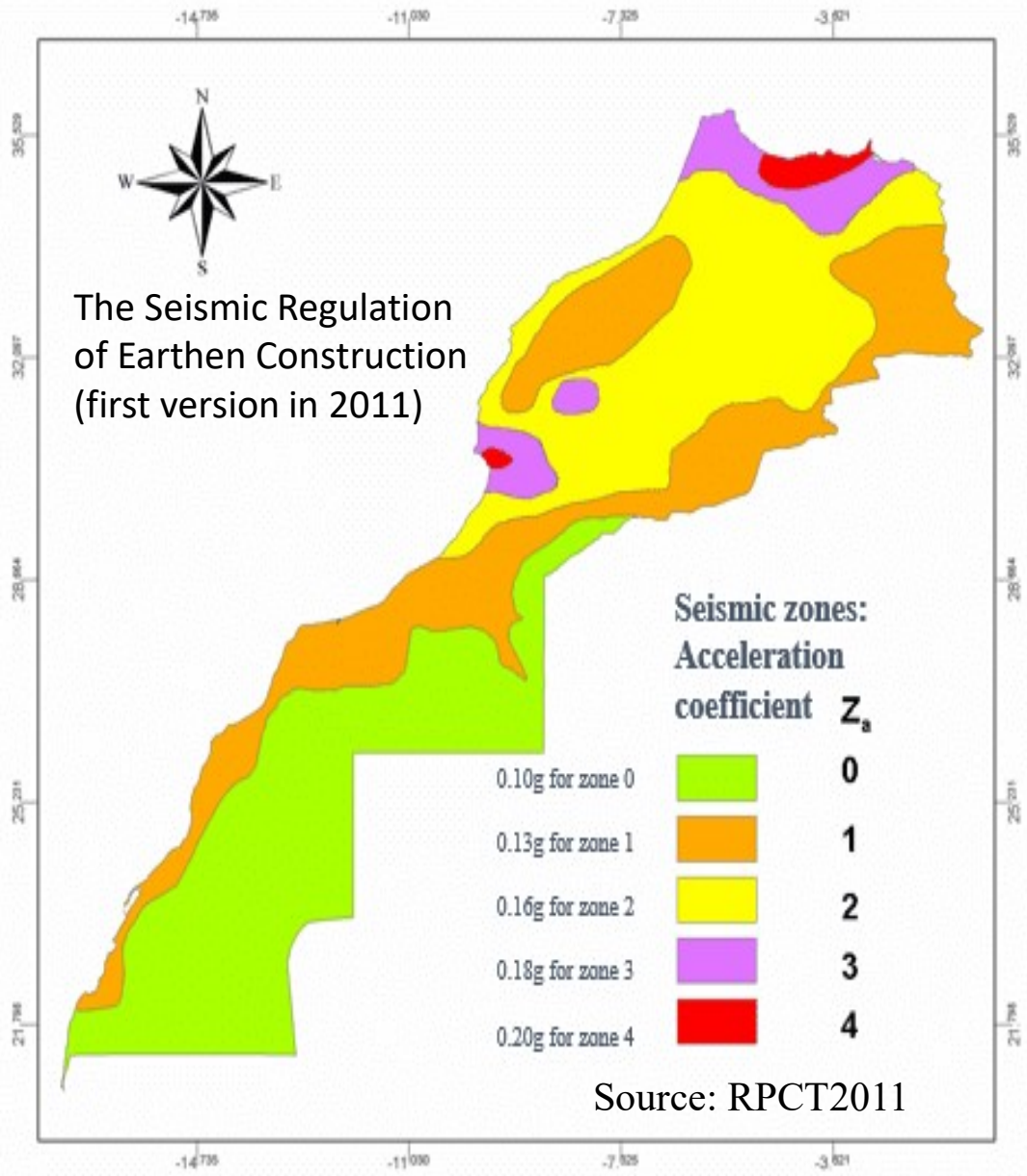


Peak Ground Acceleration-PGA Map, Al Haouz, Morocco earthquake of September 8, 2023, (Source: USGS)



The Seismic Building Regulations revised version 2011 for reinforced concrete structures

Source: RPS2011



The Seismic Regulation of Earthen Construction (first version in 2011)

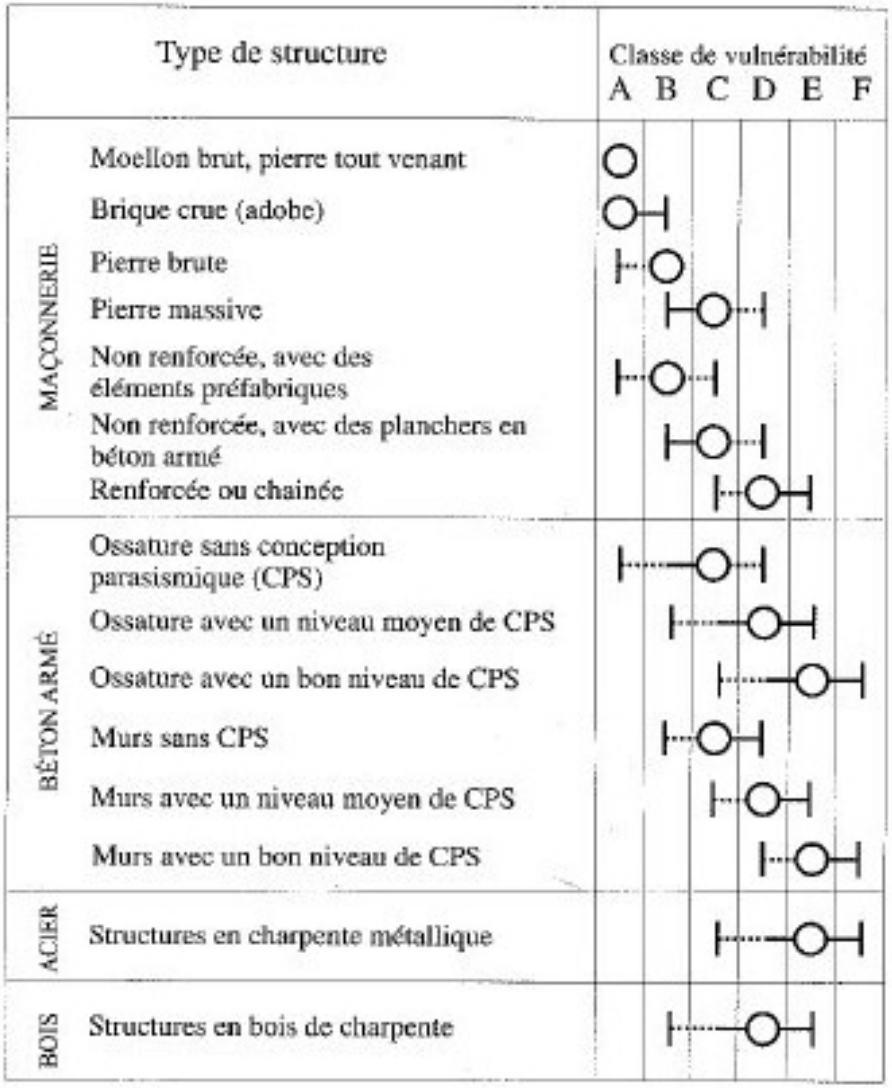
Source: RPCT2011

Décisions prises lors de la Réunion du CNGP et du CNCT relative à la reconsidération du zonage sismique des zones touchées par le séisme du 08 septembre 2023

- Validation, à l'unanimité, de la reconsidération proposée du zonage sismique des zones sinistrées en prévision de la révision générale de la règlementation parasismique ;

- Une réponse intégrée doit accompagner la reconsidération du zonage sismique reposant notamment sur les volets de la communication, la vulgarisation, le suivi et la formation. Des moyens de communication simples relatifs aux dispositions constructives minimales à respecter ainsi que des sessions de formation au profit de la main d'œuvre seront mis en place afin de contribuer à la bonne mise en œuvre.

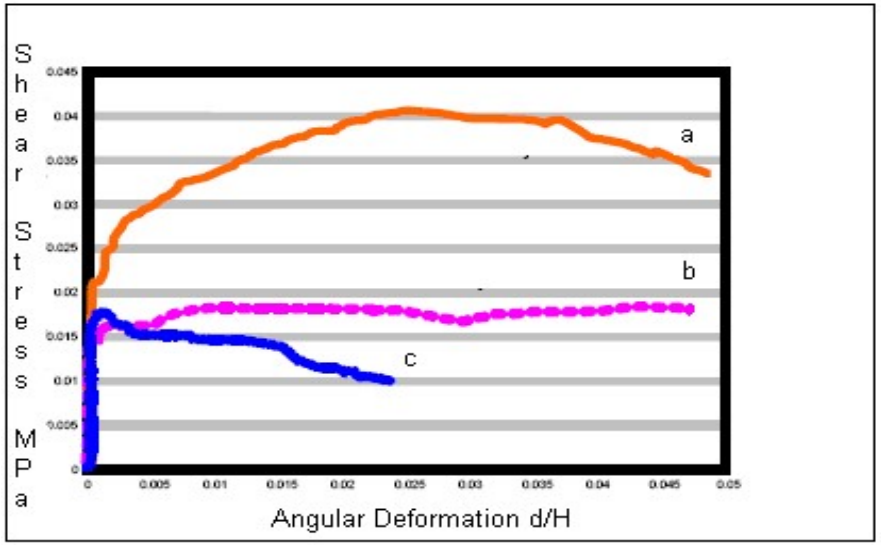
Vulnérabilité sismique du patrimoine bâti



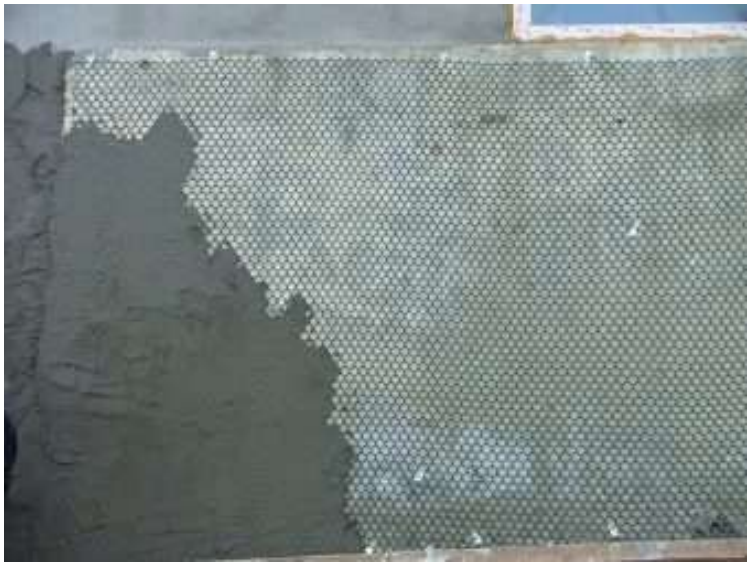
La vulnérabilité sismique d'un bâti décrit la probabilité de survenue de dommages.
Plus la vulnérabilité est élevée, plus les dommages et les dégâts seront importants.

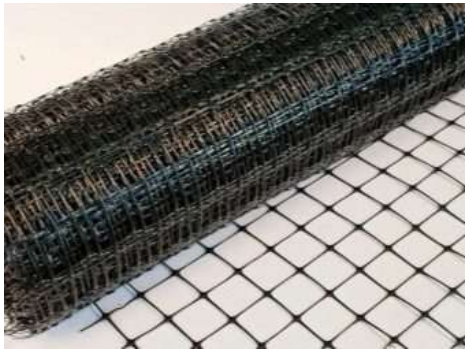
Classes de vulnérabilité selon EMS-98 European Macroseismic Scale 1998

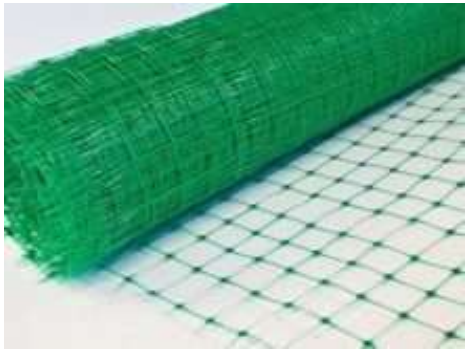
Adobe test-house reinforced with polymer mesh and partially plastered.



Comparison between compressive strength (Y-axis) and Angular distortion (X-axis) of:
c) Adobe wall without polymer mesh – Blue line,
b) Adobe wall without plastering- Pink line,
and a) Adobe wall with polymer mesh reinforcement- Orange line.
(Torrealva 2009)





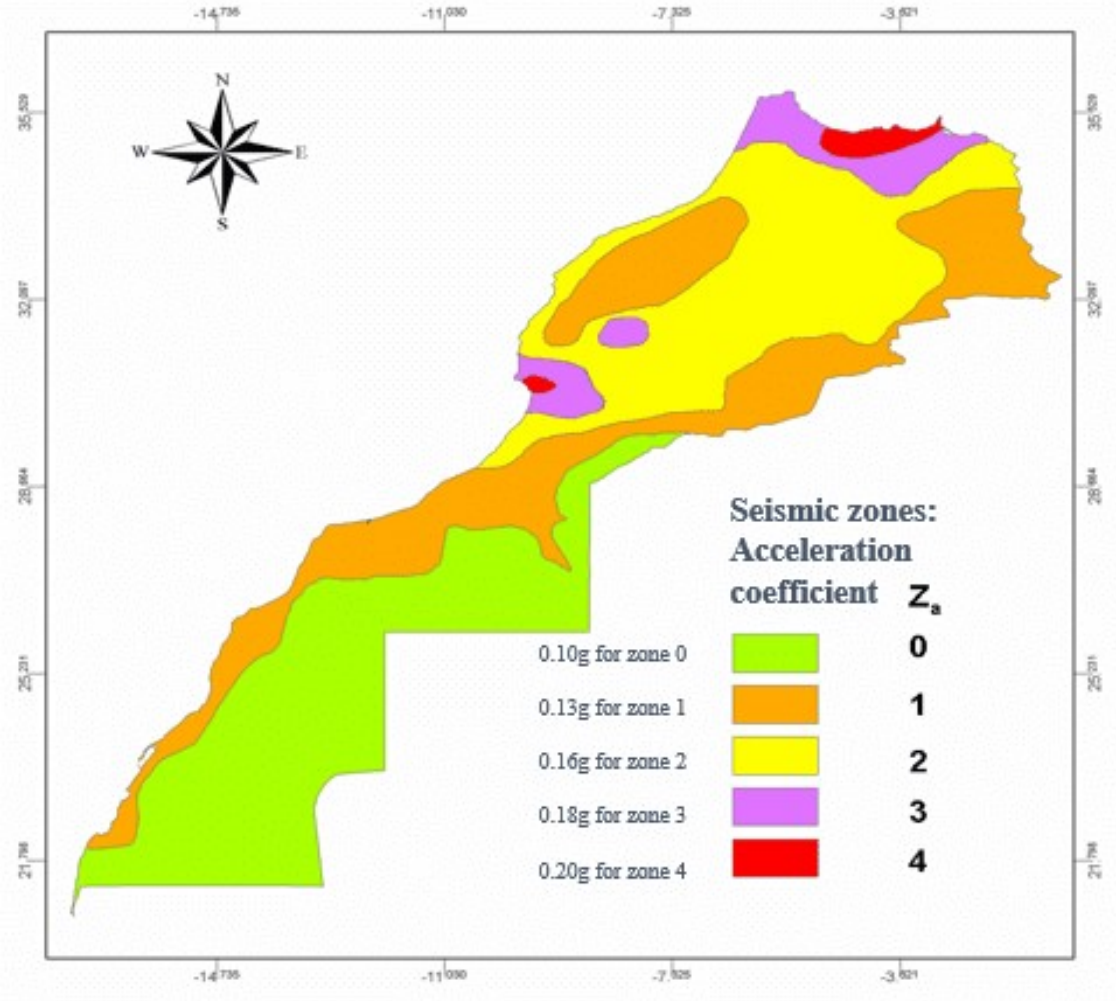


hub.brussels ecobuild
share more, build better

ENA de Rabat

BC architects

Décret n° 2-12-666 du 17 rejeb 1434 (28 mai 2013) approuvant le règlement parasismique pour les constructions en terre et instituant le Comité national des constructions en terre.



TITRE PREMIER

DU REGLEMENT PARASISMIQUE DES CONSTRUCTIONS EN TERRE

ARTICLE PREMIER. – Est approuvé tel qu'il est annexé au présent décret le règlement parasismique pour les constructions en terre.

Ce règlement est divisé en deux sections :

Section première. – **Le règlement parasismique pour l'auto - construction en terre, dénommé «RPACTerre 2011»**

Section 2. – **Le règlement parasismique des constructions en Terre fixant les règles parasismiques auxquelles doivent satisfaire les constructions aux fins de garantir la sécurité , dénommé «RPCTerre 2011»**

Ces deux règlements sont applicables aux bâtiments conçus selon les techniques locales traditionnelles et dont la structure porteuse utilise essentiellement la terre, la paille, le bois, le palmier, les roseaux ou des matériaux similaires.

Les matériaux couverts par ces règlements sont l'adobe, l'adobe stabilisé, le bloc de terre comprimé, le pisé, le torchis, la bauge et le mortier de terre.

ART. 3. – Le règlement parasismique pour l'auto-construction en terre «RPACTerre 2011» s'applique aux bâtiments d'habitation construits sans l'obligation de recours à un architecte ou à un ingénieur spécialisé, prévu par les articles 50 et 51 de la loi n°12-90 relative à l'urbanisme, promulguée par le dahir n°1-92-31 du 15 hija 1412 (17 juin 1992).

Les bâtiments d'habitation en terre seront limités en hauteur à un seul niveau dans les deux zones d'accélérations sismiques maximales 4 et 3, ou dans la zone à haut risque sismique.

Les bâtiments d'habitation en terre seront limités en hauteur à deux niveaux dans les zones d'accélérations sismiques maximales 2, 1 et 0.

Il est interdit de construire des bâtiments en terre sur des sols mous, expansifs, marécageux, inondables, à risque de glissement, en présence de nappe phréatique superficielle, ou à moins de deux km de distance de failles géologiques actives connues.

ART. 4. – Le règlement parasismique des constructions en Terre « RPCTerre 2011 » s'applique aux constructions en terre soumises à l'obligation de recours à un architecte ou à un ingénieur spécialisé, prévue par les articles 50 et 51 de la loi n° 12-90 précitée.

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 dans les deux zones d'accélérations sismiques maximales 4 et 3 et à deux niveaux dans les zones d'accélérations sismiques maximales 2, 1 et 0.

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'accélérations maximales (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.

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 ou 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.

Murs et ouvertures

- Epaisseur minimale des murs porteurs : 0,4 m
- Epaisseur minimale des murs cloisons : 20 cm
- La largeur d'une ouverture ne doit pas être supérieure à 1,2 m (fenêtre ou porte)
- La distance entre un angle extérieur et une ouverture ne sera pas inférieure à 1.2 m
- La somme totale des largeurs des ouvertures d'un mur ne doit pas excéder 40% de la longueur totale du mur en zone sismique 1
- La longueur d'appui des linteaux (ancrage des linteaux) dans chaque coté de l'ouverture ne doit pas être inférieure à 50 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
- Une configuration adéquate est montrée sur la figure suivante

VULNÉRABILITÉ CLIMAIQUE & ADAPTATION

Le Règlement Thermique de Construction au Maroc (RTCM)

Cent-troisième année – N° 6306 — 12 moharrem 1436 (6 novembre 2014)

ISSN 0851 - 1217

ROYAUME DU MAROC

BULLETIN OFFICIEL

EDITION DE TRADUCTION OFFICIELLE

Décret n° 2-13-874 du 20 hija 1435 (15 octobre 2014) approuvant le règlement général de construction fixant les règles de performance énergétique des constructions et instituant le comité national de l'efficacité énergétique dans le bâtiment. 4256

La parution du décret dans le BO :

Le décret 2-13-874, relatif à la norme générale de construction fixant les règles énergétiques des constructions, est paru dans l'édition du 06 Novembre 2014 du bulletin officiel.

extraits du décret…

REGLEMENT GENERAL DE CONSTRUCTION
FIXANT LES REGLES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE DE CONSTRUCTIONS

Objet

Le Règlement général de construction fixant les règles de performance énergétique des constructions a pour objet de fixer les caractéristiques thermiques que doivent respecter les bâtiments par zone climatique, afin d'atteindre les résultats suivants:

- réduire les besoins en chauffage et en climatisation des bâtiments ;
- améliorer le confort thermique au sein des bâtiments ;
- participer à la baisse de la facture énergétique nationale ;
- réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Ledit règlement s'appliquera aux bâtiments résidentiels et tertiaires à édifier, à l'exception de l'habitat individuel rural, et permettra de produire une nouvelle génération de constructions plus respectueuses de l'environnement, avec une meilleure utilisation des techniques de l'efficacité énergétique dans le bâtiment.

ART. 4. – Les dispositions du présent décret ne s'appliquent pas aux :

- bâtiments existants avant l'entrée en vigueur de ce décret ;
- bâtiments à usage agricole, artisanal ou industriel, autres que les locaux servant à l'habitation dans ces mêmes locaux ;
- bâtiments utilisés pour des opérations manufacturières, industrielles et de stockage ;
- bâtiments ou parties des bâtiments qui requièrent des conditions intérieures particulières, tels que les serres, les entrepôts, ...

TITRE II

DU COMITÉ NATIONAL DE L'EFFICACITÉ ÉNERGETIQUE DANS LE BÂTIMENT

ART. 5. – Il est créé un comité dit « Comité national de l'efficacité énergétique dans le bâtiment » chargé notamment de :

Ce comité, peut s'adjoindre tout organisme ou expert dont la participation est jugée utile et ce, à la demande de son président.

Ledit comité se réunit une fois par an et à chaque fois qu'il est nécessaire à la demande de son président.

Le secrétariat du comité national de l'efficacité énergétique dans le bâtiment est assuré par le ministère chargé de l'habitat.

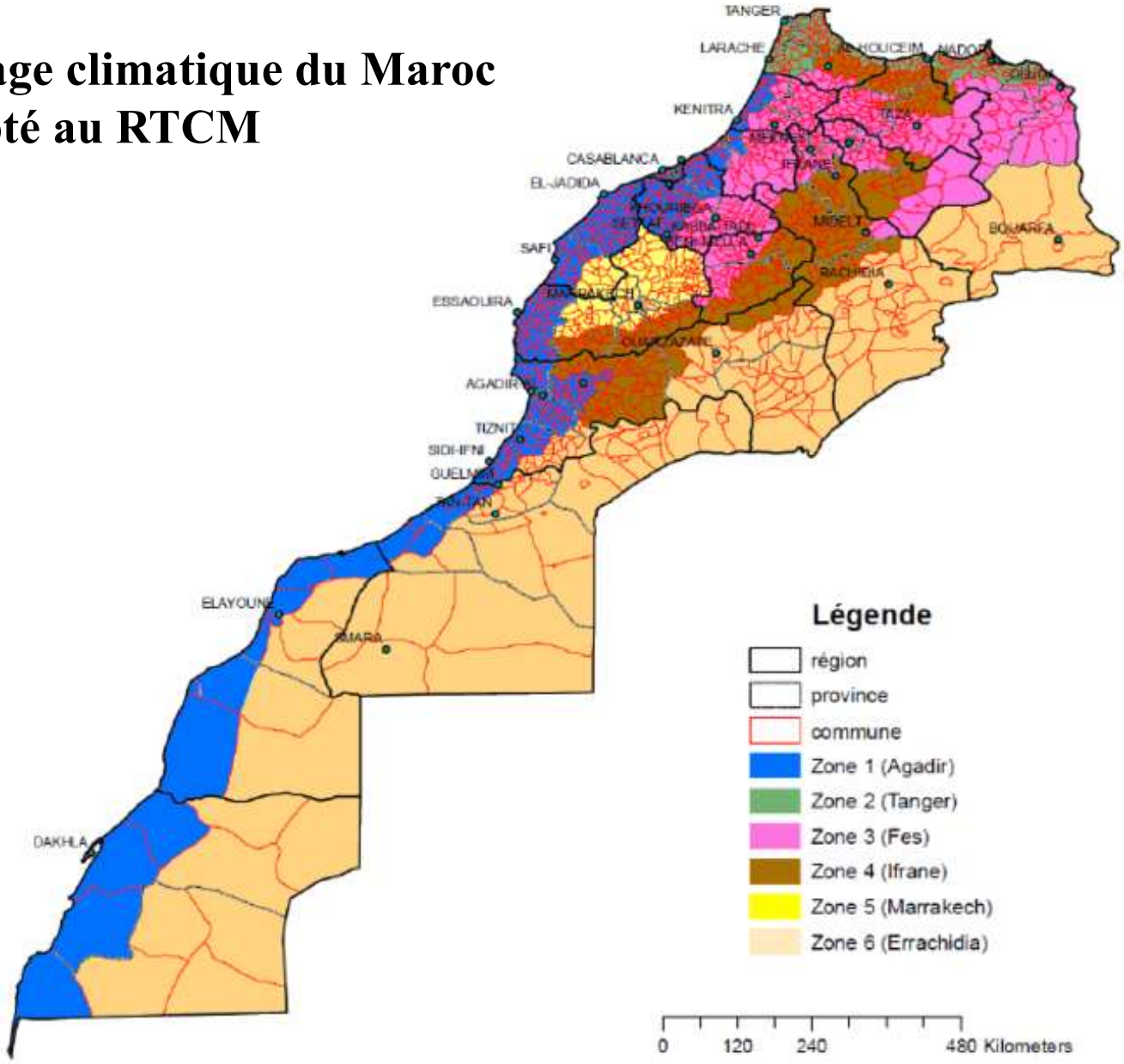
TITRE III

DISPOSITIONS DIVERSES

ART. 7. – Le ministre de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire, le ministre de l'intérieur, le ministre de l'habitat et de la politique de la ville, le ministre de l'équipement, du transport et de la logistique, le ministre de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent décret qui entre en vigueur un (1) an après sa publication au *Bulletin officiel*.

Fait à Rabat, le 20 hija 1435 (15 octobre 2014).

Zonage climatique du Maroc adapté au RTCM



Bioclimatic Analysis and EE of Stone and Earth Housing in High Atlas

Bioclimatic analysis using Szokolay/Givoni psychrometer and Mahoney's tables

- Szokolay/Givoni bio climatic diagram and Mahoney's tables have been used. There are still useful tools to give general considerations of the comfort zone with some recommendations for the design of the building.

- According to the Szokolay/Givoni climatic diagram, there is a possibility to extend the comfort zone for the cold months by internal gains and in some severe cases by heating.

- Based on a diagnosis of some climatic indicators, the Mahoney tables give the performance specifications and the design recommendation for buildings in the Haut Atlas in order to have the best indoor climate:

-Layout: orientation north and south (long axis east-west);

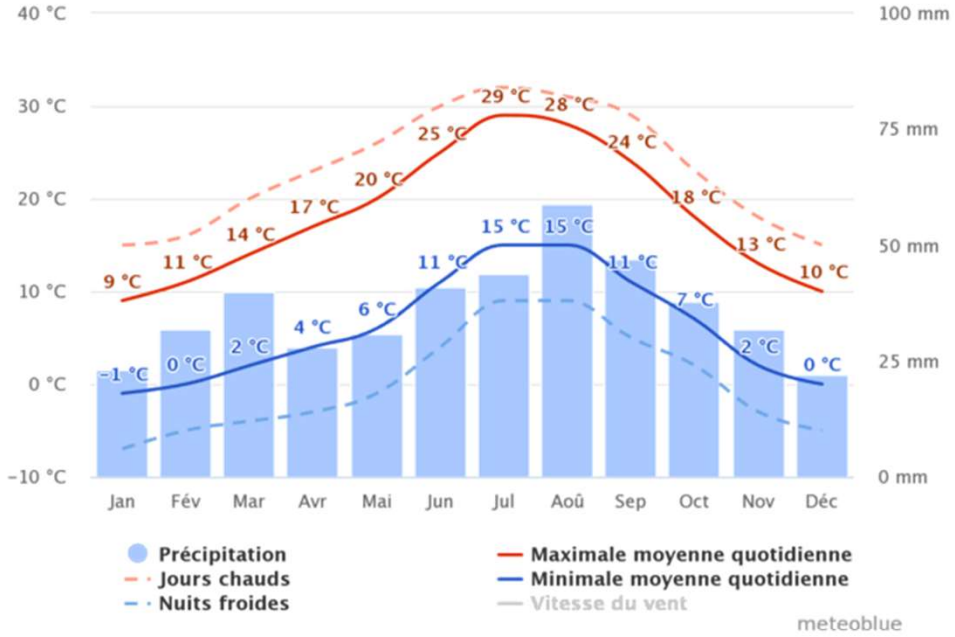
-Spacing: compact layout of estates;

-Air movement: No air movement requirement;

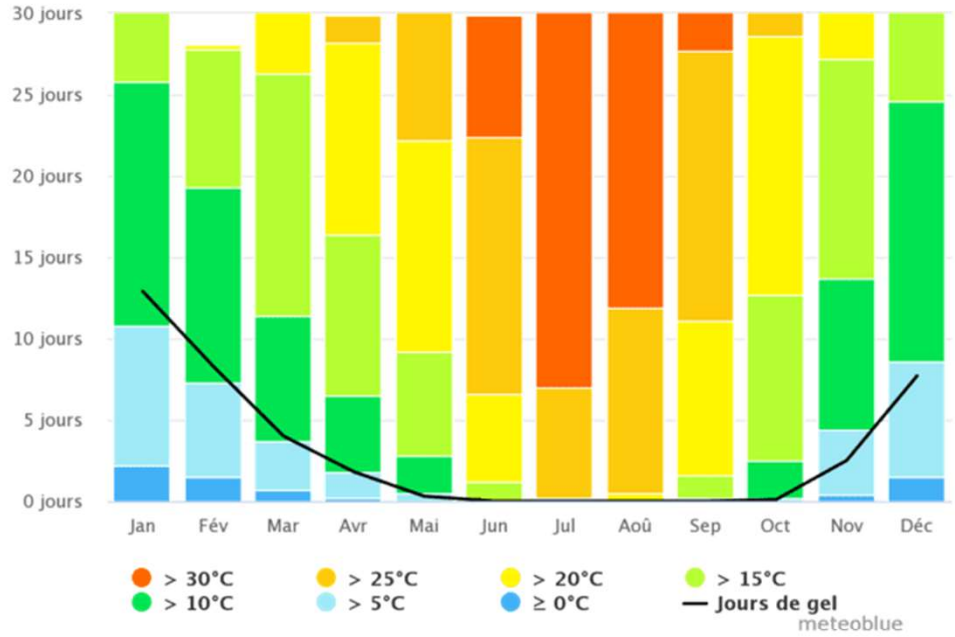
-Openings: small openings (15-25 %) to medium openings, 25-40 %;

-Walls and floors: heavy, over 8h time-lag;

-Roofs: heavy, over 8h time-lag.

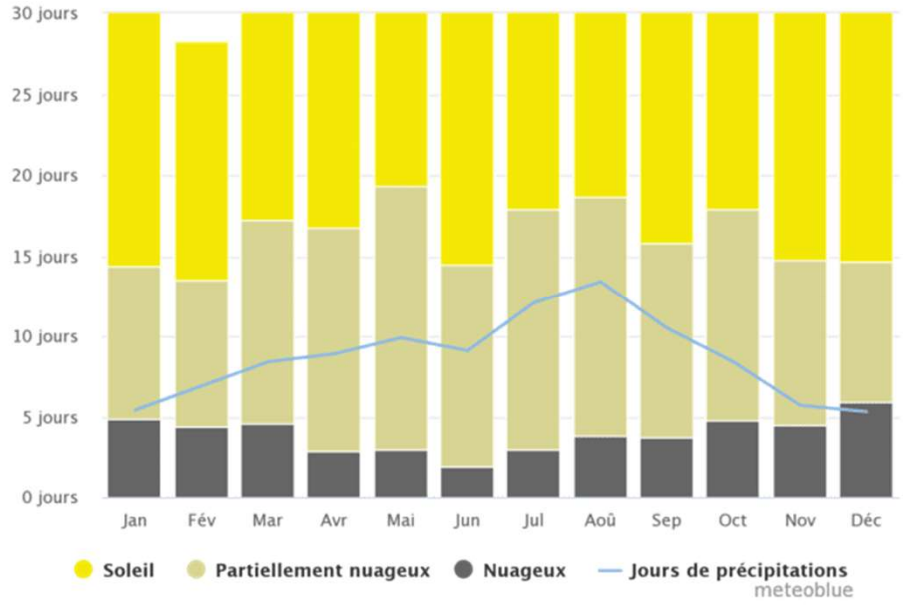


Températures et précipitations moyennes



Températures maximales

Zone froide



Ciel nuageux, soleil et jours de précipitations

Source: https://www.meteoblue.com/

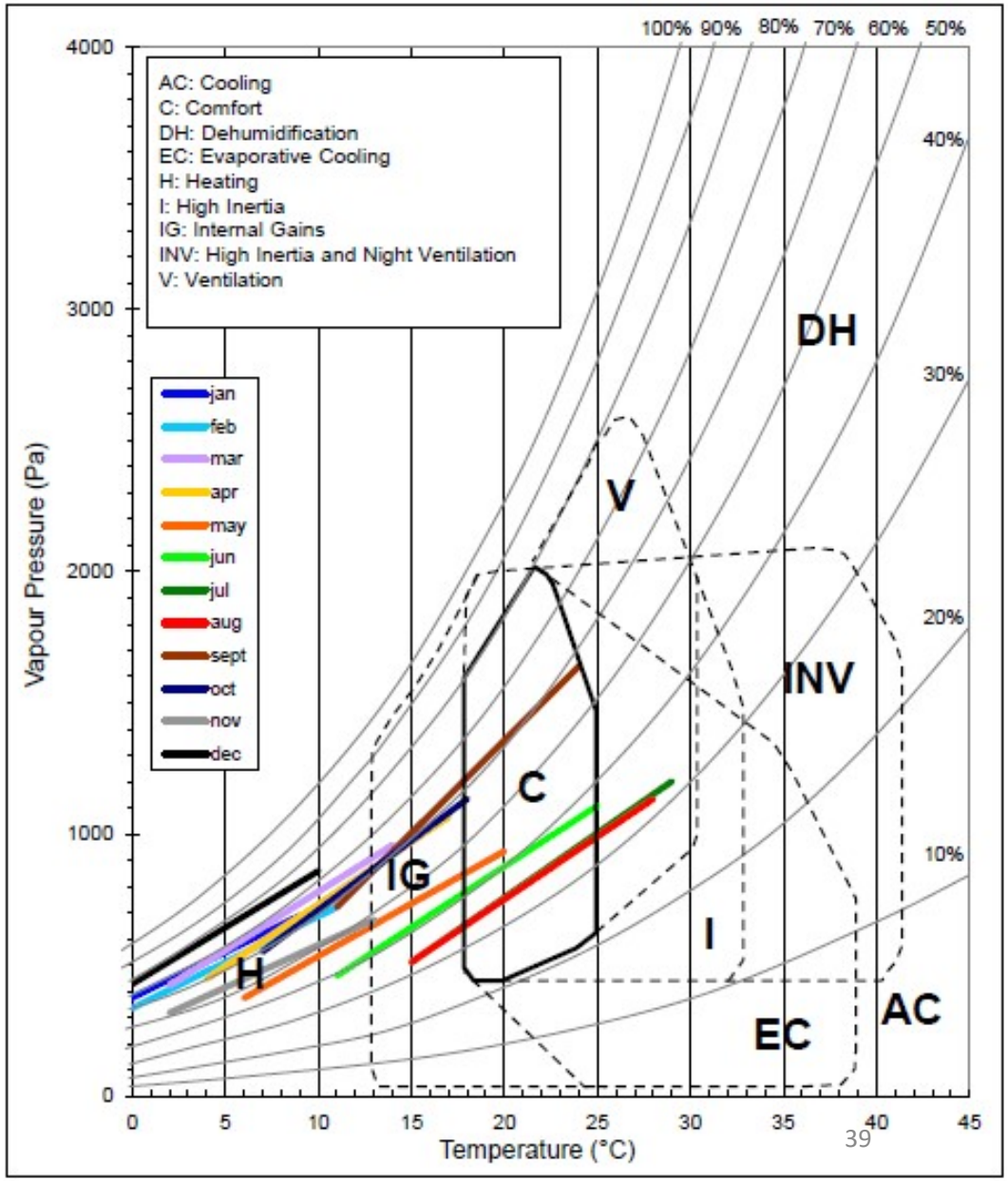
Mahoney Tables:
General Recommendations
Haut Atlas
Latitude 31°N

Layout	
X	Orientation north and south (long axis east–west)
	Compact courtyard planning
Spacing	
	Open spacing for breeze penetration
	As above, but protection from hot and cold wind
X	Compact layout of estates
Air movement	
	Rooms single banked, permanent provision for air movement
	Rooms double banked, temporary provision for air movement
X	No air movement requirement
Openings	
	Large openings, 40–80%
	Very small openings, 10–20%
X	Medium openings, 20–40%
Walls	
	Light walls, short time-lag
X	Heavy external and internal walls
Roofs	
	Light, insulatted roofs
X	Heavy roofs, over 8h time-lag
Outdoor sleeping	
	Space for outdoor sleeping required
Rain protection	
	Protection from heavy rain necessary

Bioclimatic Diagram (Givoni)

Location	**Haut Atlas**
Longitude (°)	7
Latitude (°)	31
Altitude (m)	2200

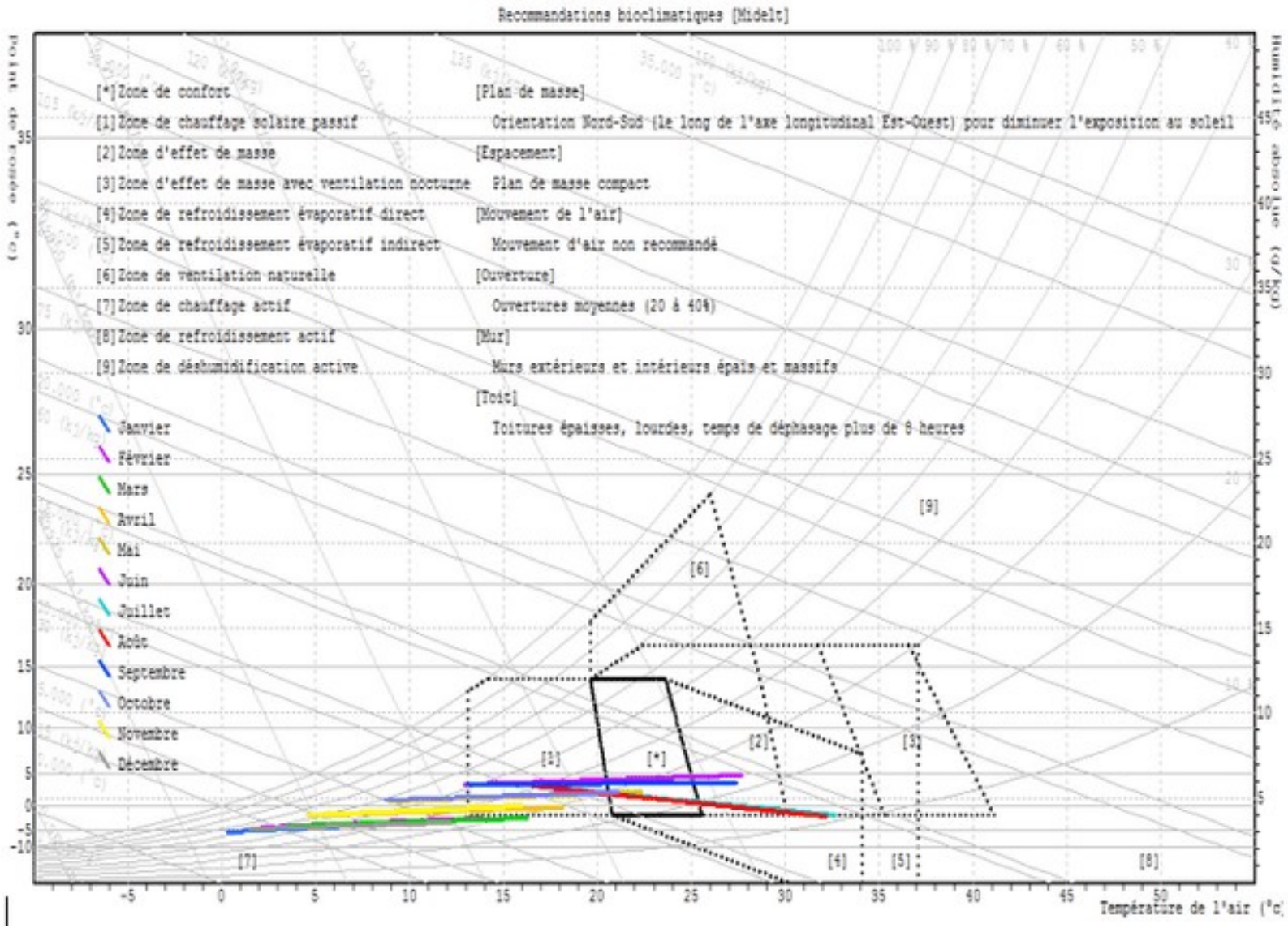
Zone froide



Zone froide

Szokolay bioclimatic Chart

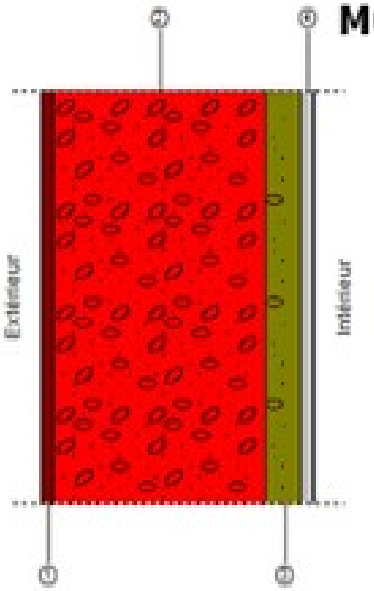
The average comfort limits between 19.5°C and 25.5°C with an average of 40% relative humidity



Szokolay bioclimatic chart for Midelt (Source: Awrash)

Zone froide

Murs

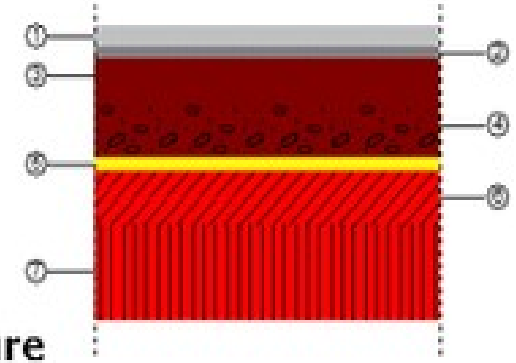


Couches
1 - Enduit mortier de terre: 2 cm
2 - Pierre locale: 35 cm
3 - Isolant TH panneau laine minérale: 6 cm
4 - Enduit plâtre: 2 cm
Épaisseur totale: 45.0 cm
Caractérisation thermique
Coefficient de transmission thermique: 0.54 W/(m² K)

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**

Toiture



Couches
1 - Dess 1 Barbotine de chaux: 3 cm
2 - Dess 2 Enduit de finition Sable Chaux: 2 cm
3 - Dess 3 Forme de pente en terre battue: 5 cm
4 - Couche de terre Argile ou Limon: 10 cm
5 - Lit de roseaux: 2 cm
6 - Solives en bois: 8 cm
7 - Poutres maîtresses en bois: 15 cm
Épaisseur totale: 45.0 cm
Caractérisation thermique
Coefficient de transmission thermique: 0.42 W/(m² K)

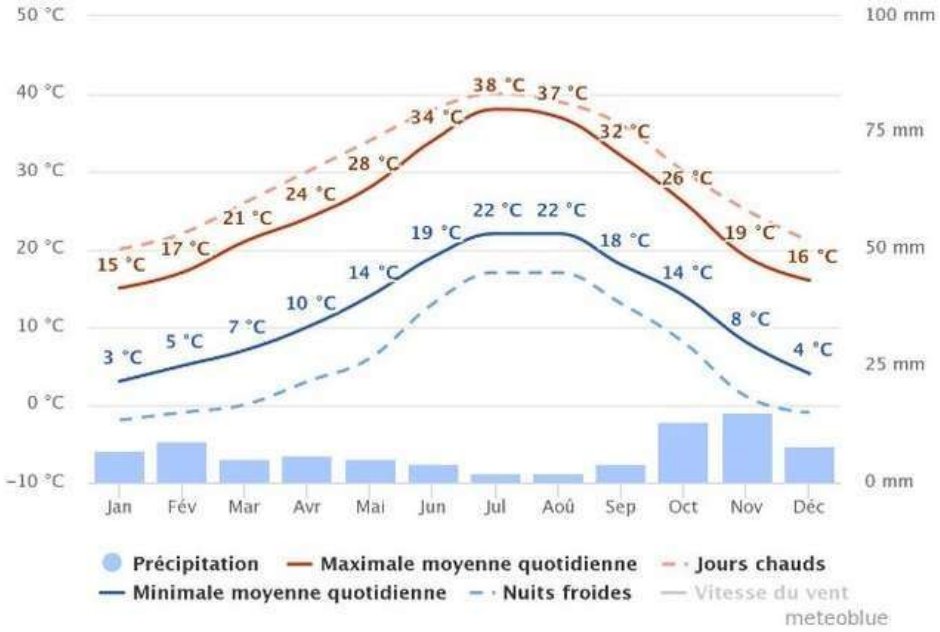
Valeur de U pour les murs et la tuoiture

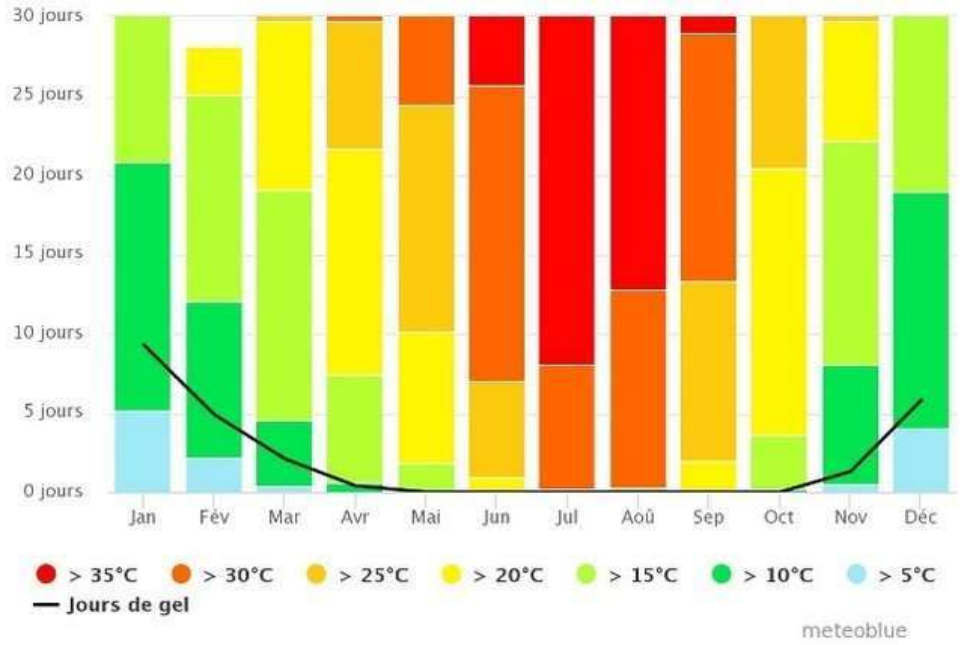
Référence	Coefficient de transmission thermique	Conforme
Toiture terrasse	0.42 W/m²K	✓

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**

Earthen architecture

Zone chaude



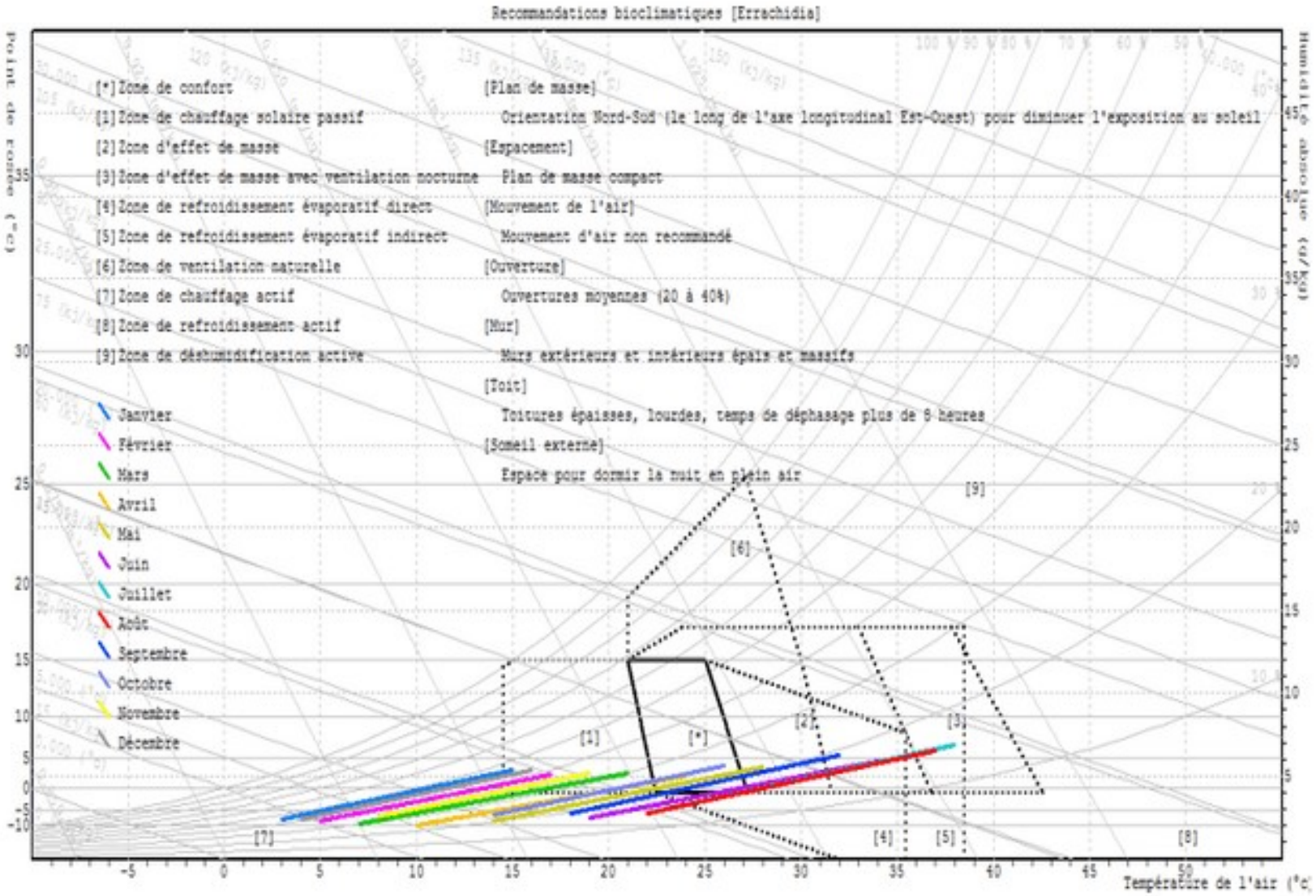


Climatic data in Errachidia, Temperatures (www.meteoblue.com)

Zone chaude

Szokolay bioclimatic Chart

The average comfort limits between 21°C and 27°C with an average of 35% relative humidity

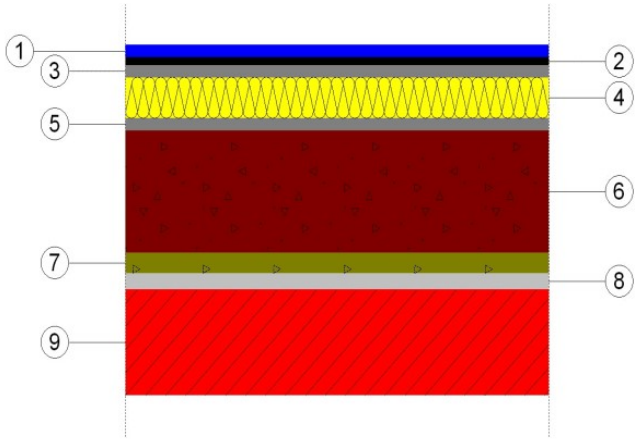


Szokolay bioclimatic chart for Errachidia (Source: Awrash)

Zone chaude

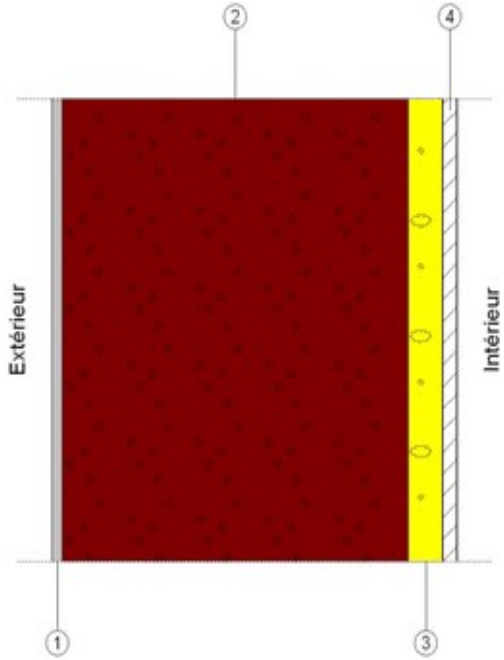
Thermal performance of construction elements:

The U value



Couches
1 - Céramique/porcelaine: 1.5 cm
2 - Asphalte pur: 1 cm
3 - Mortier (Masse volumique sèche 1700): 1.5 cm
4 - Laines de verre (Masse volumique nominale 8): 5 cm
5 - Mortier (Masse volumique sèche 1700): 1.5 cm
6 - Argile ou limon: 15 cm
7 - Sable et gravier: 2.5 cm
8 - Enduit de chaux: 2 cm
9 - Résineux lourds: 13 cm
Épaisseur totale: 43.0 cm
Caractérisation thermique
Coefficient de transmission thermique: 0.49 W/(m²K)

Toiture



Couches
1 - Enduit à la chaux: 1.5 cm
2 - Pisé, bauge, béton de terre stabilisé, blocs de terre comprimée: 50 cm
3 - Panneaux fibres de bois: 5 cm
4 - Plâtre courant d'enduit intérieur, masse volumique nominale 500: 2 cm
Épaisseur totale: 58.5 cm
Caractérisation thermique
Coefficient de transmission thermique: 0.51 W/(m²K)

Mur

Zone froide
Zone chaude

U value

- **Poor thermal quality: U > 1.5 W/m² °C**
- **Average thermal quality: 1 < U < 1.5 W/m² °C**
- **Fairly good thermal quality: 0.8 < U < 1. W/m² °C**
- **Good thermal quality: 0.5 < U < 0.8 W/m² °C**
- **Outstanding thermal quality: 0.3 < U < 0.5. W/m² °C**
- **Excellent thermal quality: U < 0.3 W/m² °C**

	U_{wall} (W/m² °C)	U_{roof} (W/m² °C)	R_{ground} (m² °C/W)
Climate Zone 4 (Midelt) Glazing rate			
16-25%	≤0,60	≤0,55	≥1,25
26-35%	≤0,60	≤0,55	≥1,25
36-45%	≤0,55	≤0,49	≥1,25
Calculated U-value of traditional buildings in Midelt or Errachidia	**0.51**	**0.49**	**1,34**
Climate Zone 6 (Errachidia) Glazing rate			
16-25%	≤0,70	≤0,65	≥1,00
26-35%	≤0,60	≤0,55	≥1,00
36-45%	≤0,55	≤0,49	≥1,00

Conclusions

L'Agdal du Haut Atlas = patrimoine naturel, social et culturel.
Sa préservation est essentielle face aux défis posés par les CC.
Sa résilience et celle de sa population dépendent de la capacité collective à soutenir des pratiques durables et à valoriser les richesses culturelles et naturelles de cet écosystème.

Les sites patrimoniaux de l'architecture en terre et en pierre peuvent être mieux équipés pour faire face aux défis posés par les CC et continuer à jouer leurs rôles culturels, sociaux et économiques pour les générations futures:

-En intégrant les considérations climatiques dans les efforts de conservation du patrimoine,
-En impliquant les communautés locales,
-En promouvant la recherche et l'innovation sur les matériaux alliant propriétés traditionnelles et durabilité accrue,
-En plaidant en faveur de politiques favorables pour renforcer la résilience aux chocs climatiques et sismiques ainsi que la capacité globale des systèmes socio-écologiques.