



La modélisation numérique en tant qu'outil de pilotage de la durabilité du patrimoine bâti

Pr. Khalid EL HARROUNI

Ecole Nationale d'Architecture, Rabat, Maroc / ISCARSAH-ICOMOS

&

Pr. Abdallah EL HAMMOUMI

Faculté des Sciences, Université Mohammed V Agdal, Rabat, Maroc

CONTENU

- **Introduction**
- **Essai d'inventaire des éléments de la CSL pour la protection du patrimoine bâti type Médina**
- **Modélisation numérique, outil d'analyse de la vulnérabilité sismique du patrimoine bâti: Étude de cas**
- **Conclusion**

objectifs

Sauvegarde de la Médina

approche

Médina est une composition unique des monuments et des ensembles

- Recommandation UNESCO 1976
- Charte ICOMOS 1987
- Charte de Venise 1964)



outils

SDUF et autres DU
Loi (22-80) relative à la conservation des monuments historiques et sites.
Classification des monuments.
Classement des Médinas Fès (1981) et Marrakech (1985) en tant que Patrimoine de l'Humanité.

acteurs

Gouvernement
Autorités Locales
Création de l'ADER-Fès



PHASE 2 (1990-1998)

Réhabilitation intégrée & sauvegarde: Approfondissement et examen des composantes techniques, juridiques et financières

objectifs

Réhabilitation intégrée et sauvegarde de la Médina

approche

Médina est une entité de la structure physique–sociale-économique

(Charte ICOMOS 1987)

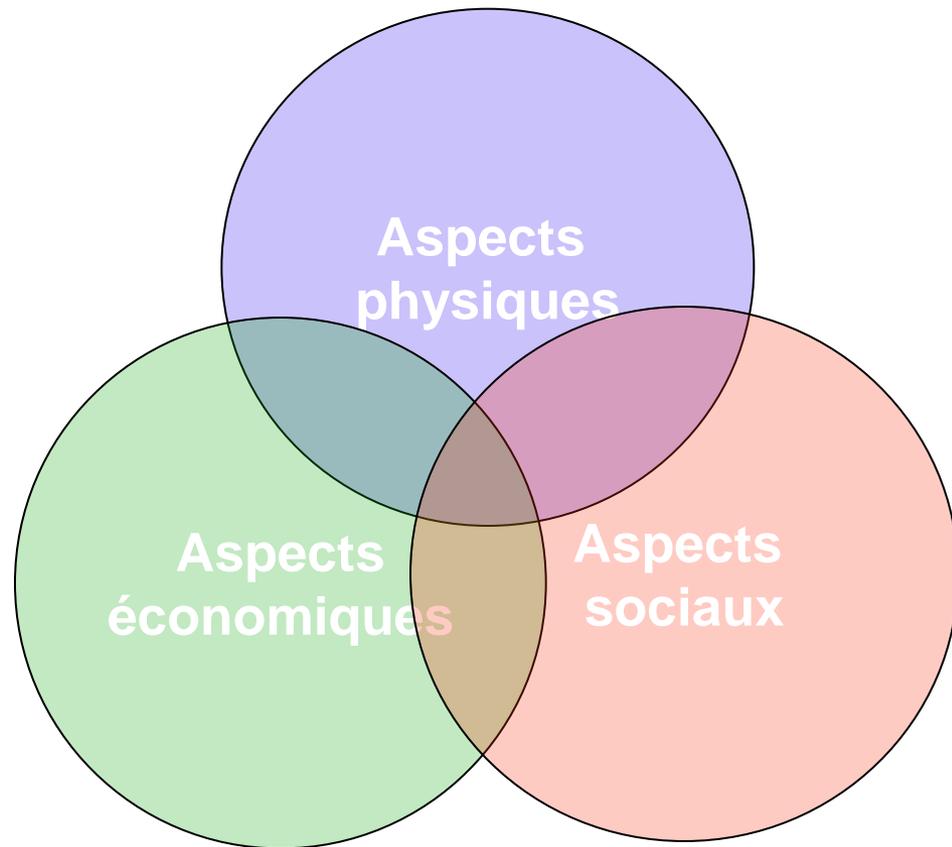
outils

Opérations à caractère exp.: restauration des monuments, réhabilitation des maisons, insertion d'équipements socio-éducatifs,...

Cadre réglementaire (PA)
SIG, FC

acteurs

Autorités publiques
La société civile
Le secteur privé



objectifs

Réhabilitation et développement de la Médina

approche

Médina est une entité de la structure physique–sociale–économique en transition Permanente à travers le Développement Urbain

(Mémoire de Vienne 2005)

outils

Plans stratégiques pour réhabilitation et développement
Plans d'actions
L'animation sociale
L'aide à la réhabilitation
Renforcement institutionnel

acteurs

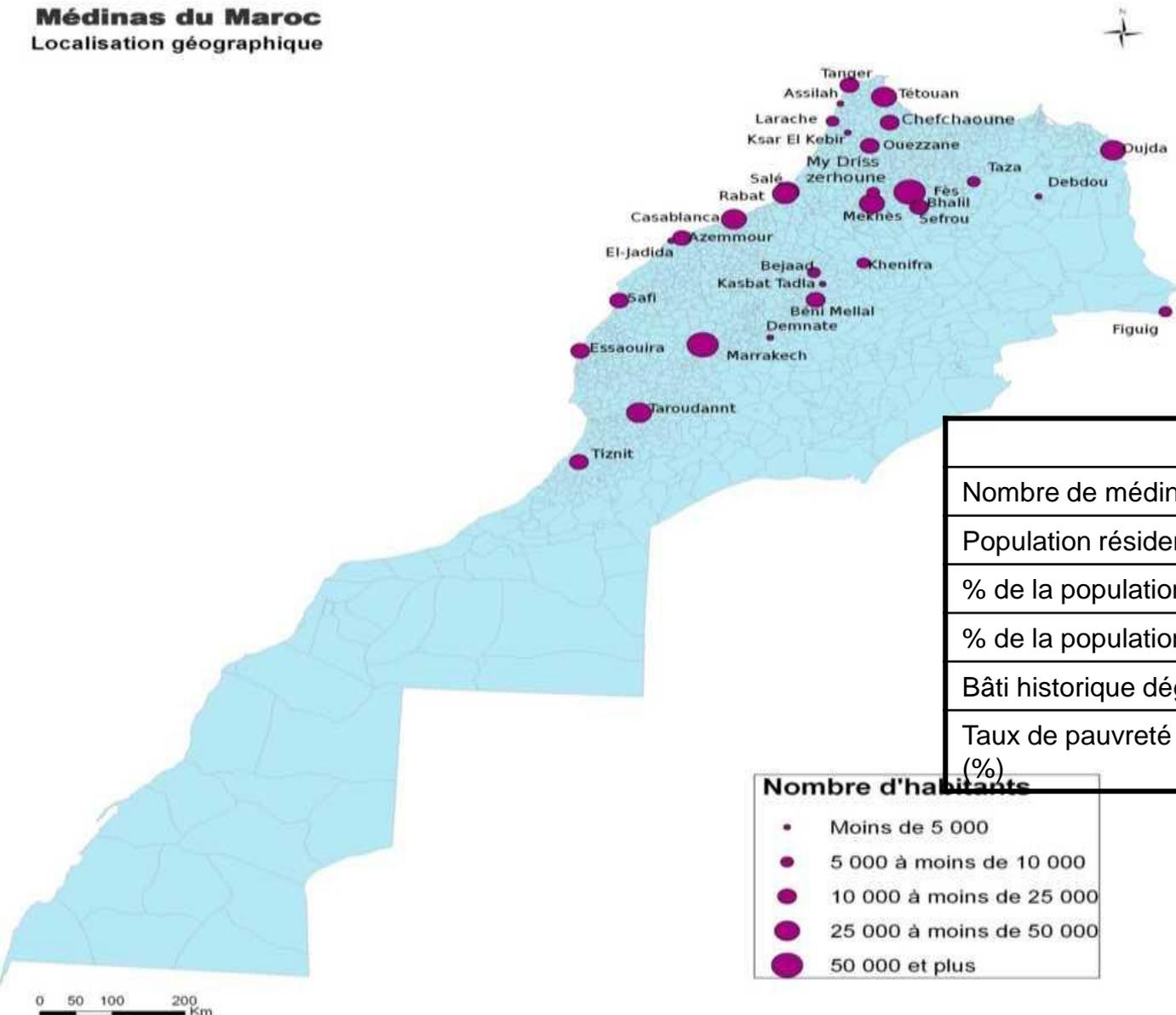
Autorités publiques
La société civile
Le secteur privé
Bailleurs de fonds int.

Orientations de la Lettre Royale aux participants à la 23ème session du Comité du Patrimoine Mondial (29 novembre 1999):

« insister une nouvelle fois sur la nécessité d'adopter une vision dynamique quant à la protection du patrimoine, en visant à intégrer ce patrimoine dans les projets de développement et non seulement à l'embaumer dans une vision de sacralisation du passé »

Médinas du Maroc

Localisation géographique



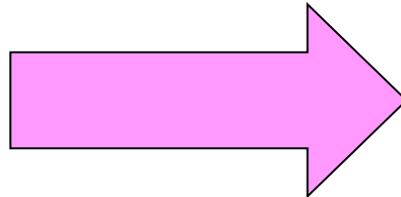
| | 2004 | 2030 |
|--------------------------------|---------|---------|
| Nombre de médinas | 31 | ? |
| Population résidente | 740.000 | 440.000 |
| % de la population urbaine | 4,50 | 1,80 |
| % de la population nationale | 2,50 | 1,15 |
| Bâti historique dégradé (%) | 50,00 | ? |
| Taux de pauvreté résidents (%) | 11.65 | ? |

objectifs
Elaborer des stratégies durables pour la sauvegarde, la conservation et la gestion du patrimoine bâti

approche
Multidisciplinaire

outils
Outils et pratiques d'aménagement et de planification pour conservation et gestion durable du contexte.
Mesures de contrôle efficace de l'impact de changements progressifs ou rapides sur le contexte.

acteurs
Autorités publiques
La société civile
Le secteur privé
Bailleurs de fonds int.

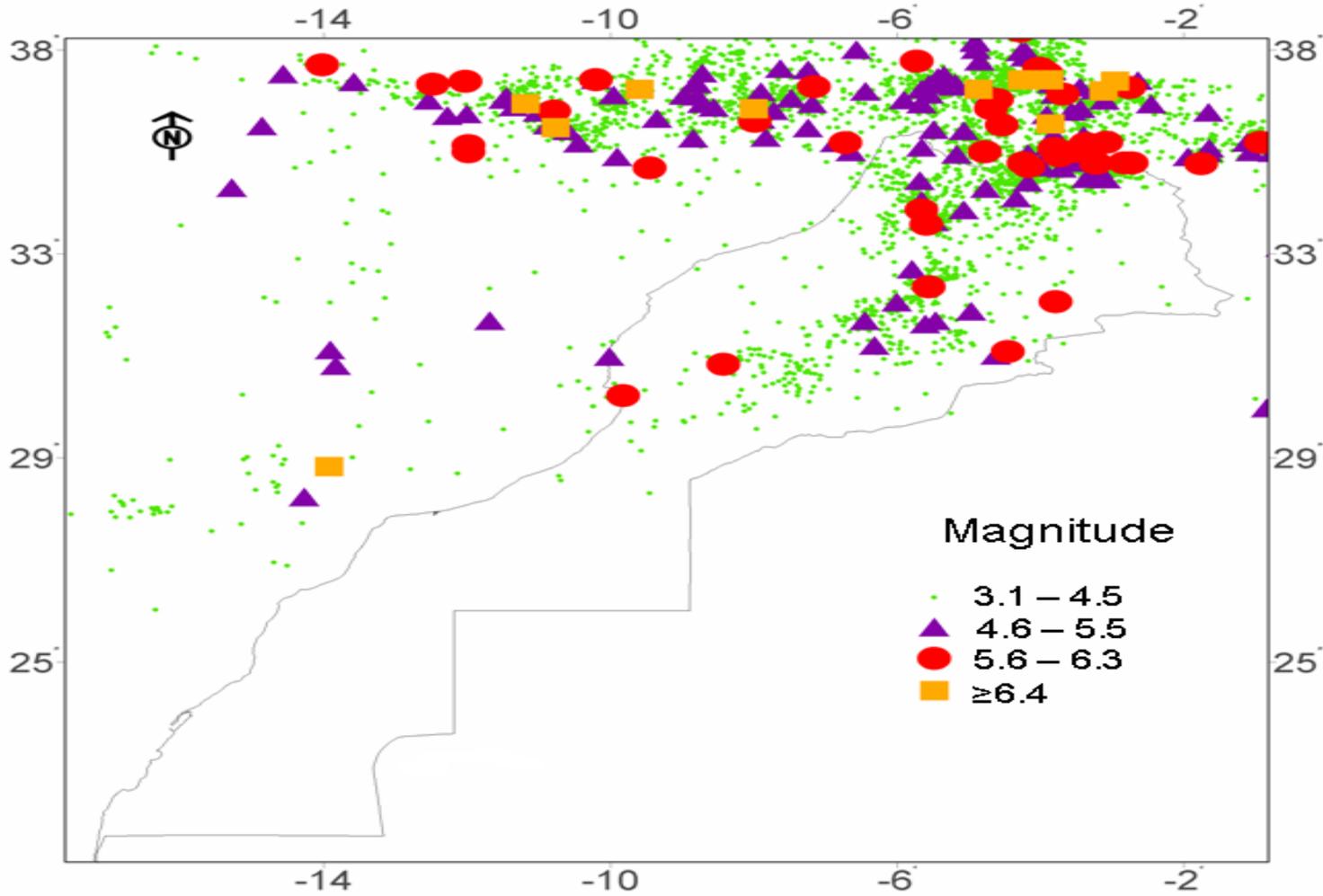


Déclaration de Kyoto (ICORP-ICOMOS 2005) sur la protection des biens culturels, des secteurs historiques et leurs milieux contre les pertes dues aux catastrophes & WCDR, Kobe, 2005

Déclaration ICOMOS sur la conservation du contexte des constructions, des sites et des secteurs patrimoniaux (2005)

Charte ICOMOS-ISCARSAH, principes pour l'analyse, la conservation et la restauration des structures du patrimoine architectural (2003)

Conclusions and the Recommendations of the International Workshop on Structural and Functional Rehabilitation of Housing in Historic Buildings in Seismic Regions, Mexico City, 1986 (Stovel, ICCROM 1998)

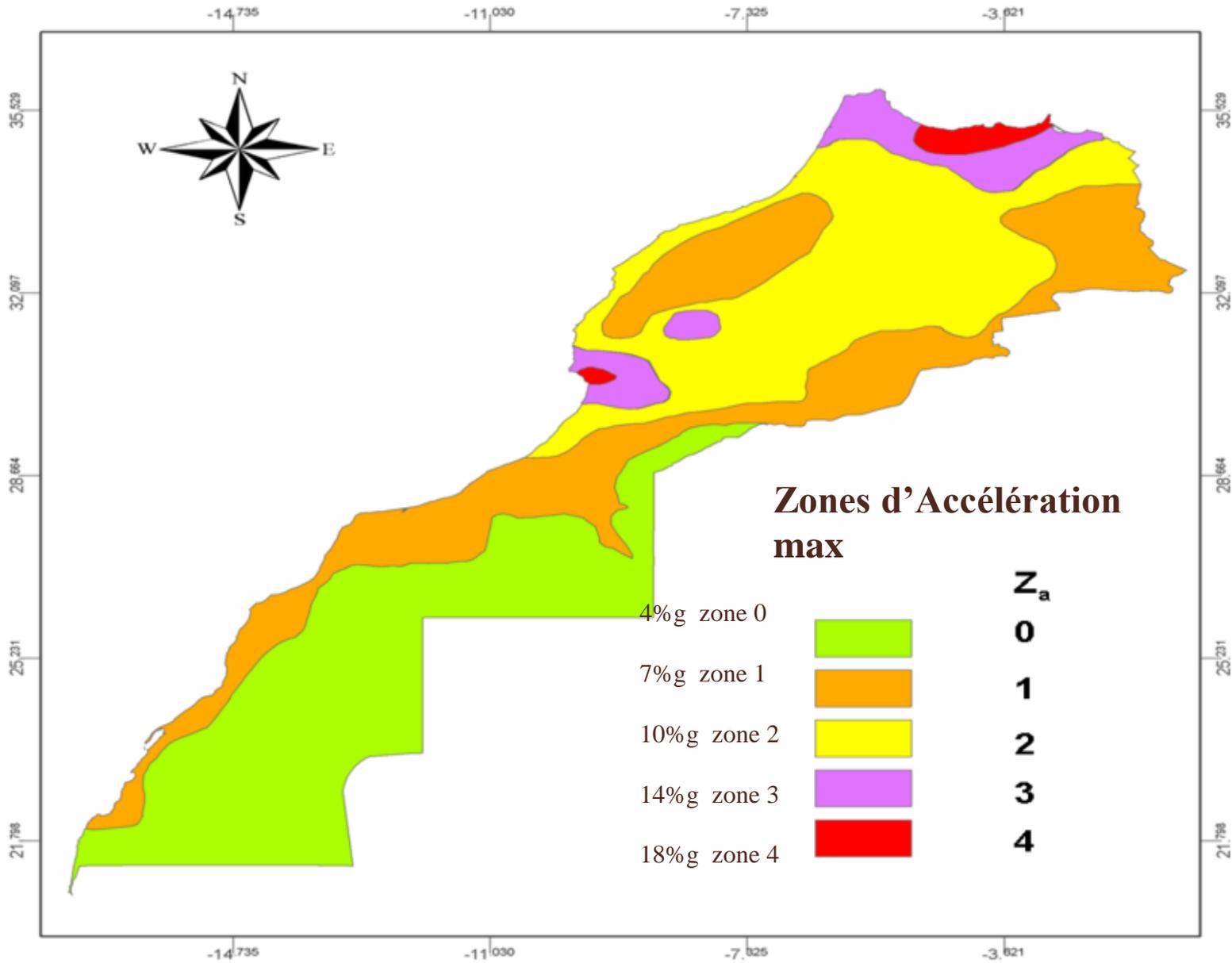


Carte de la sismicité du Maroc
1900- 2007

Sismicité historique

Les séismes les plus emblématiques :

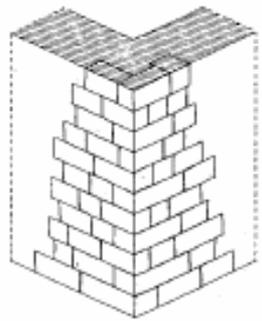
- Avant le 20ème siècle : Le 11 mai 1624, le 1er novembre 1755 de Lisbonne et le 27 novembre 1755 sont parmi les dates retrouvées dans les livres d'histoire.
- Fréquence des tremblements de terre qui ont frappé la ville de Fès (1046, 1079, 1408, 1522, 1623, 1624, 1708, 1755, 1773, 1776, 1867) .
- Agadir 1960
- Atlantique 1969
- Missour 1985
- Moulay Idriss 1987
- Essaouira 1988
- Rissani 1992
- Al Hoceima 1994
- Rabat 2001
- Al Hoceima 2004



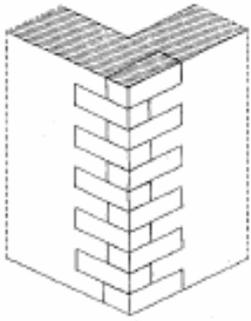
Essai d'inventaire des éléments de la Culture Sismique Locale pour la protection du patrimoine bâti

La récupération de ces méthodes traditionnelles pourra être développée comme étant les mesures « parasismiques douces » et durables, applicables au bâti ancien pour la sauvegarde du patrimoine culturel.

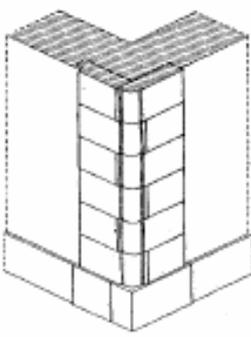
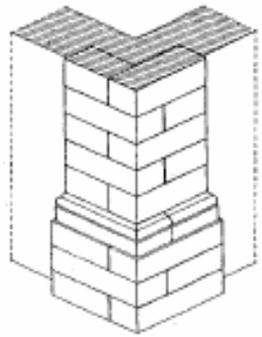
Renforcement à la Base & Chaînage vertical



Tipo A



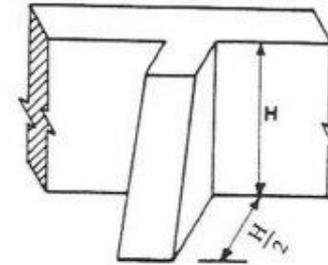
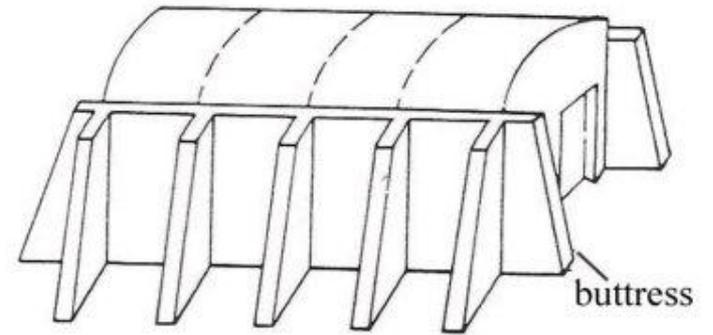
Tipo B



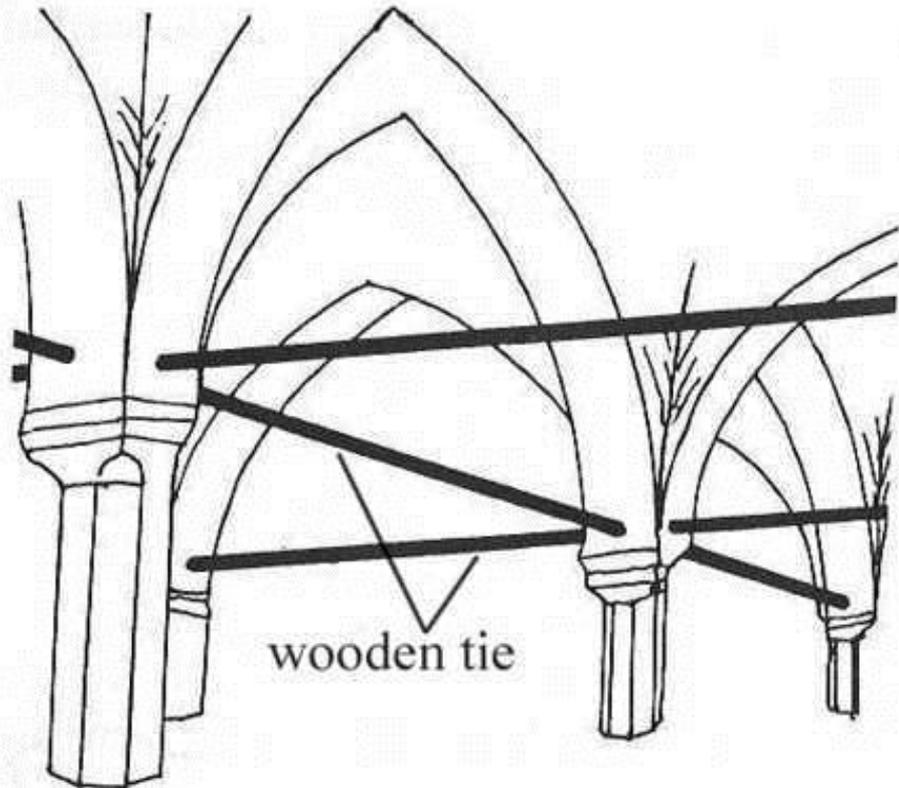
Le chaînage vertical réalisé avec pierre de taille permet de renforcer et de consolider les angles du bâtiment



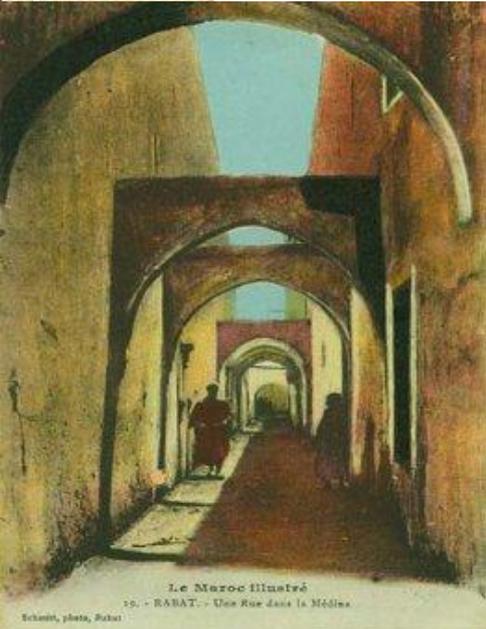
Contreforts



Voûtes, Arcs et tirants

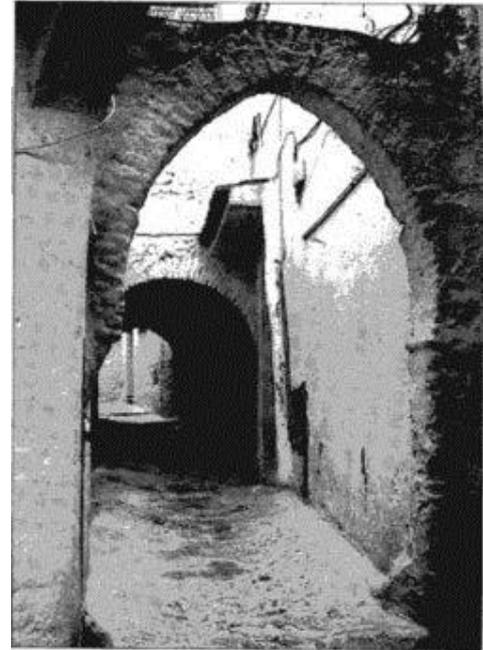


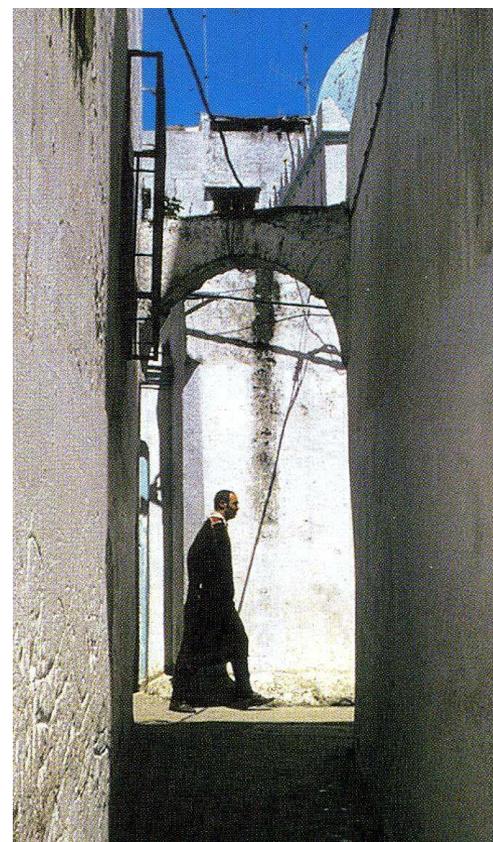
Arcs de confortement ou Arcs de contraste



Ruelle, passage étroit:
éléments de rupture
dans la continuité d'un
linéaire de façades.

Arcs maçonnés en
pierre offrant une
relative souplesse et
transmettent les σ -h
au niveau des
planchers





Sabbats



La morphologie urbaine et la construction de bâtiments avec des rues étroites sont probablement une solution pour réduire les dommages sismiques et de prévenir les maisons de s'effondrer.

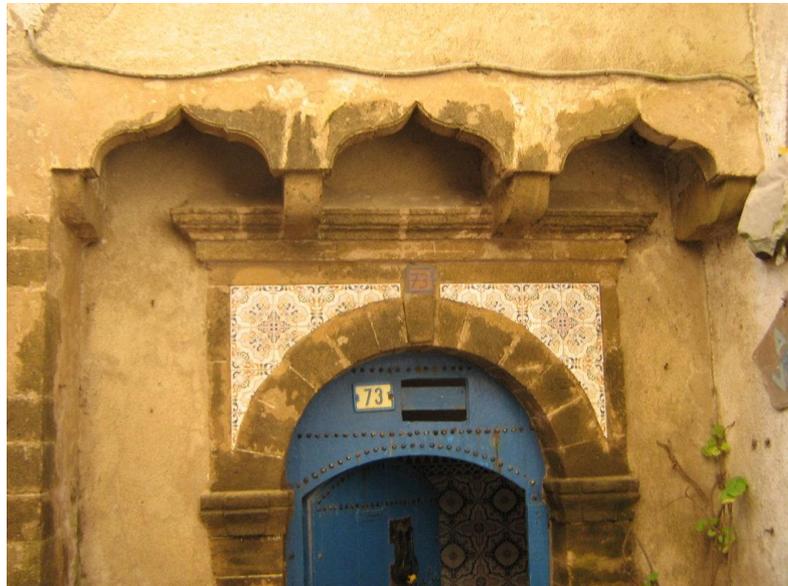
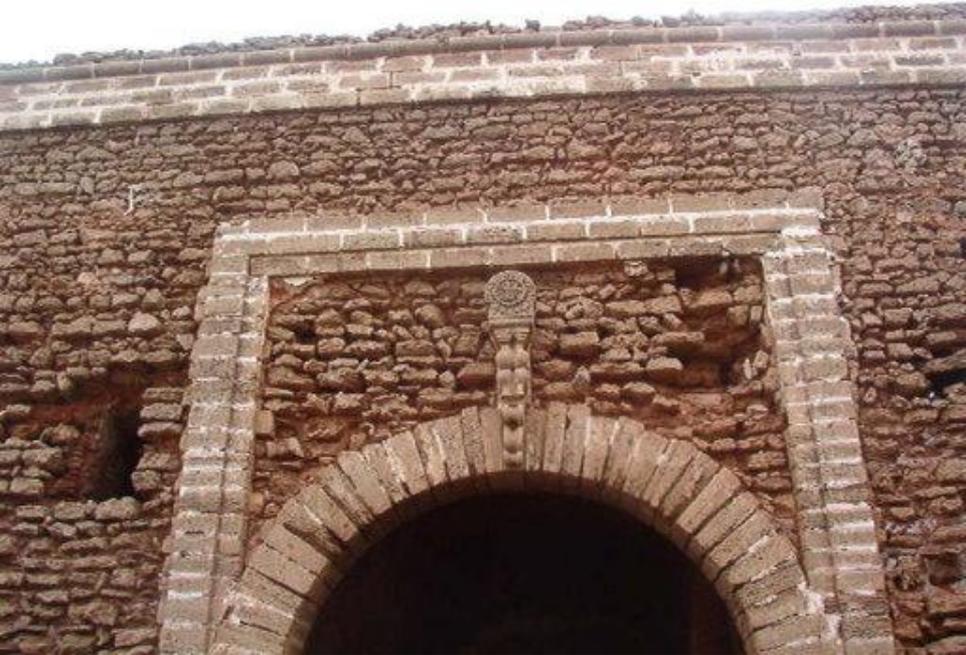
Arcs de décharge et Entourage d'ouvertures

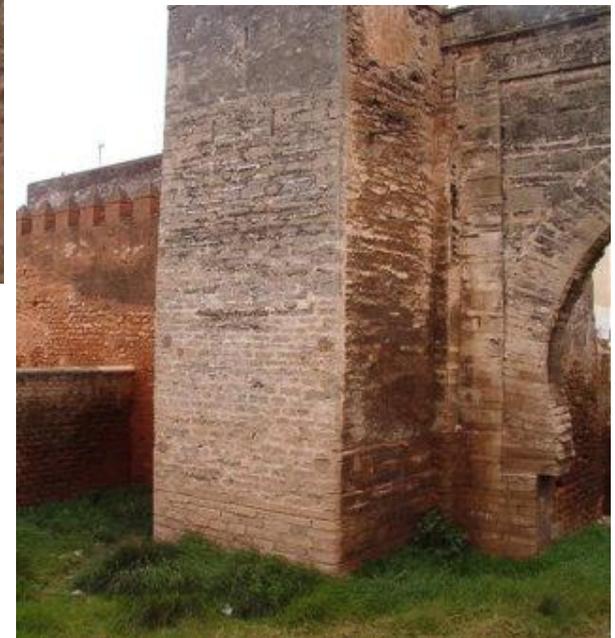


Une ouverture dans une façade constitue un point vulnérable en cas de déformation du bâti. Très souvent sur des constructions anciennes, des arcs en pierre taillée situés au dessus d'une ouverture.

Cela permet de transmettre de part et d'autre de l'ouverture, la charge du poids du mur situé à l'aplomb de celle-ci.

Arcs de décharge et Entourage d'ouvertures





L'aspect sismorésistant de ces arcs offre une résistance considérable au mouvement latéral et évite toute rupture provoquée par ce mouvement en particulier dans les angles.

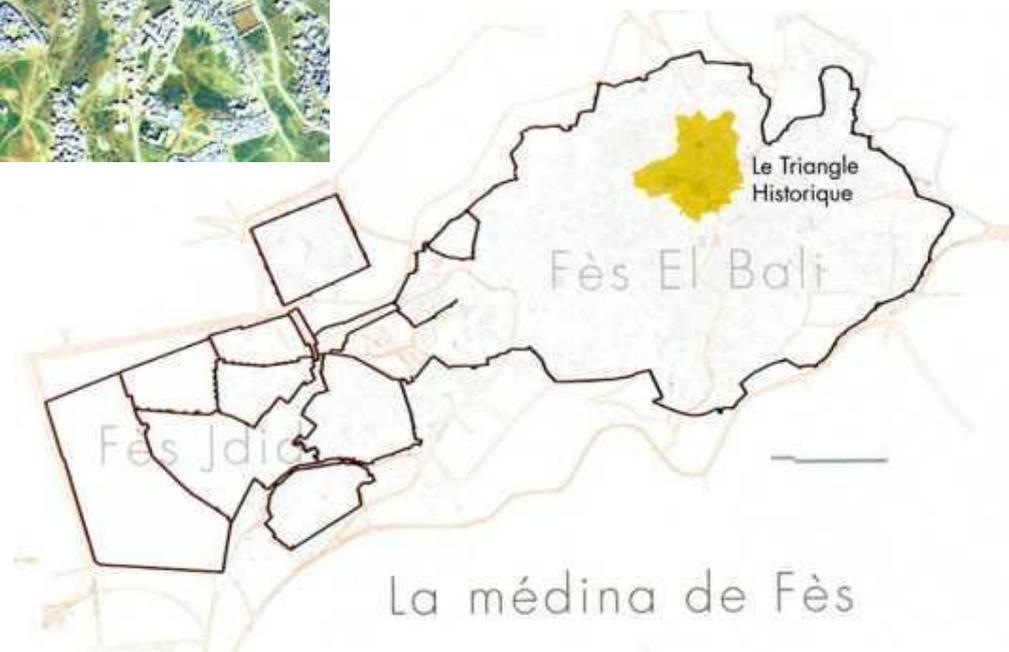
Approche d'analyse de vulnérabilité sismique et de requalification du patrimoine bâti par la modélisation numérique

- Recherche historique:** *connaître de façon précise la constitution du cadre bâti (géométrie, matériaux, désordres, ...)*
- Etape expérimentale:** *caractériser les propriétés des matériaux nécessaires pour les simulations numériques; déterminer la loi de comportement homogénéisée des maçonneries constitutives de la structure verticale du cadre bâti; test d'identification dynamique,...*
- Modélisation numérique:** *calcul en 3D et étude paramétrique permettant de déceler les facteurs influençant la sécurité du cadre bâti en identifiant les mécanisme de dommages, la vulnérabilité sismique,*
- Intervention, Confortement, ...**

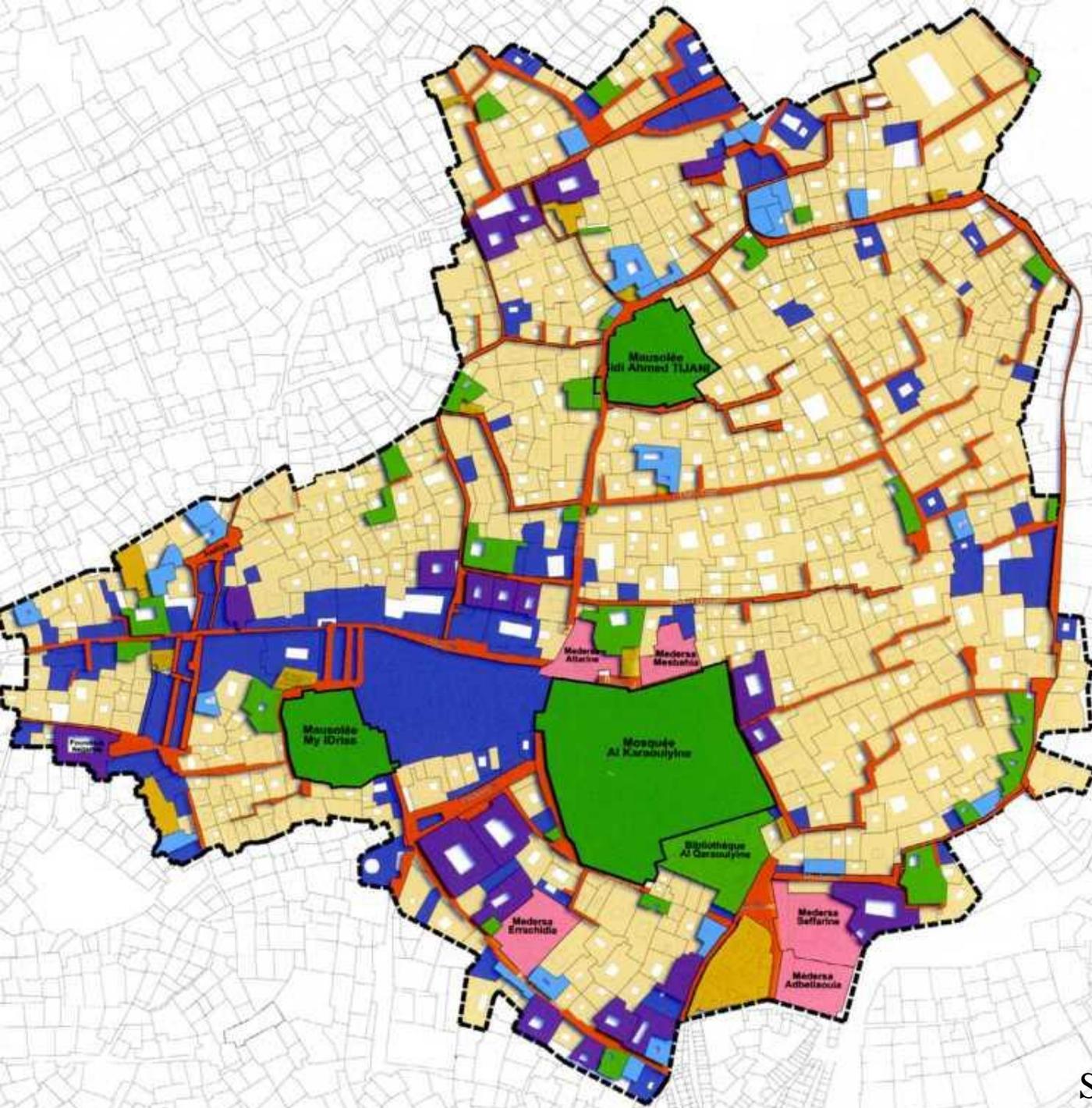
The image shows the interior of a medersa, characterized by its intricate architectural details. The walls are covered in complex geometric and floral carvings, known as stucco work. A prominent feature is a large, central archway, flanked by smaller arches. The ceiling is also highly decorated, with a series of small, repeating arches along the top edge. The overall atmosphere is one of historical grandeur and artistic craftsmanship.

**Etude de cas: Médersa Errachidia
ou Médersa Ras Cherratine**



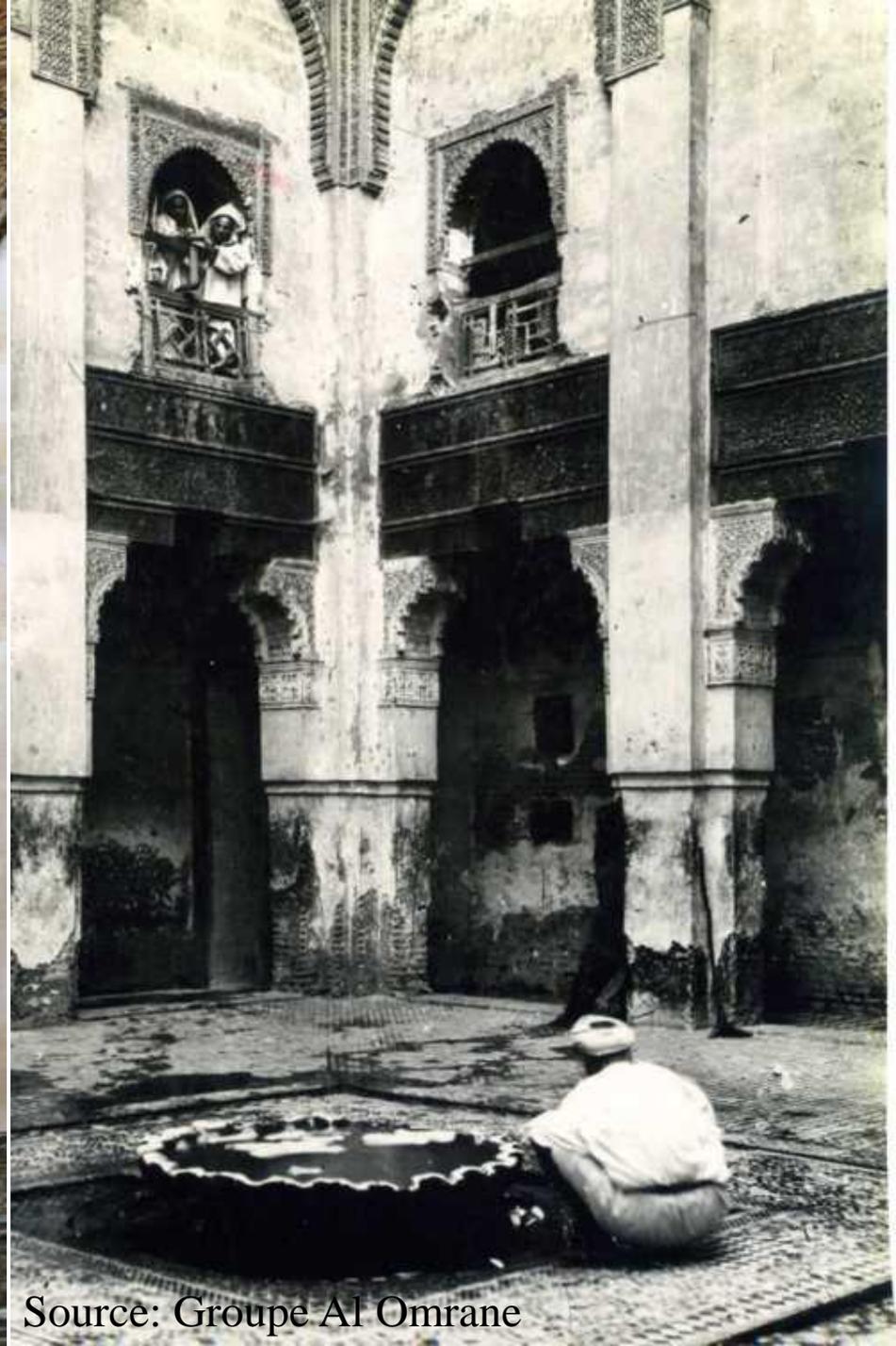


Source: Groupe Al Omrane



- Maisons d'habitation
- Draz
- Fondouk
- Lieux de culte
- Equipements traditionnels
- Souk, commerce
- Medersa

Source: Groupe Al Omrane



Source: Groupe Al Omrane









Source: Groupe Al Omrane

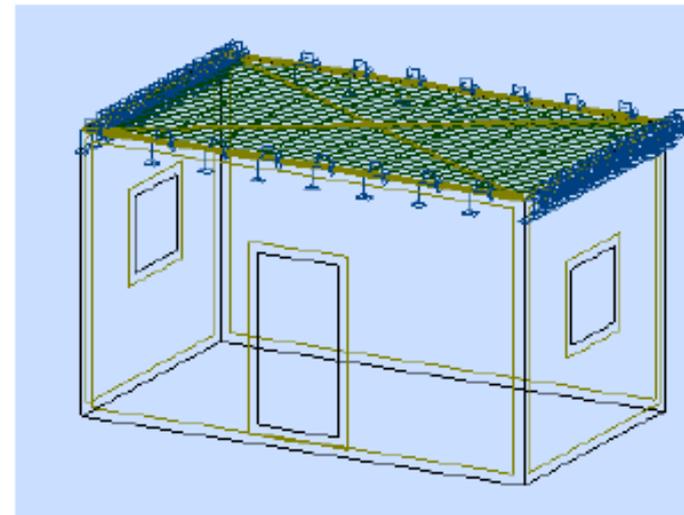


Source: Groupe Al Omrane

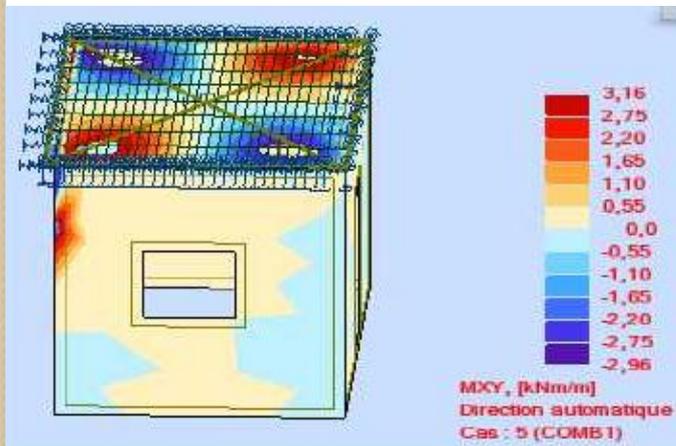
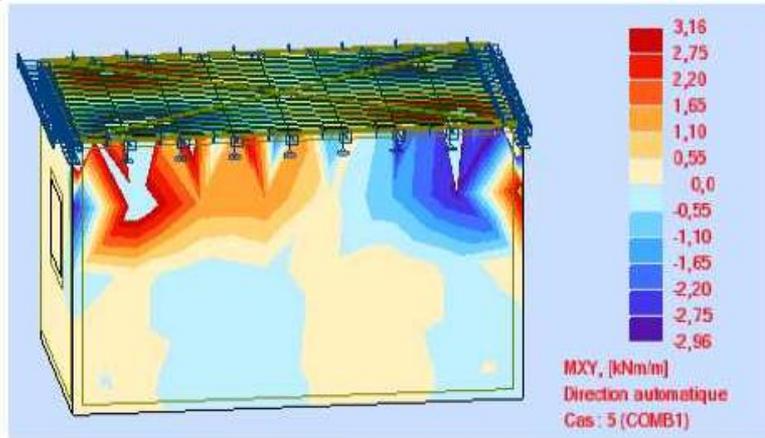
Validation du modèle numérique

Modélisation en éléments finis : prototype de maison en adobe du laboratoire de l'Université Catholique, Pérou.

Comparaison avec les résultats des essais réalisés, sur cinq prototypes sur table vibrante unidirectionnelle, par le laboratoire en 2007

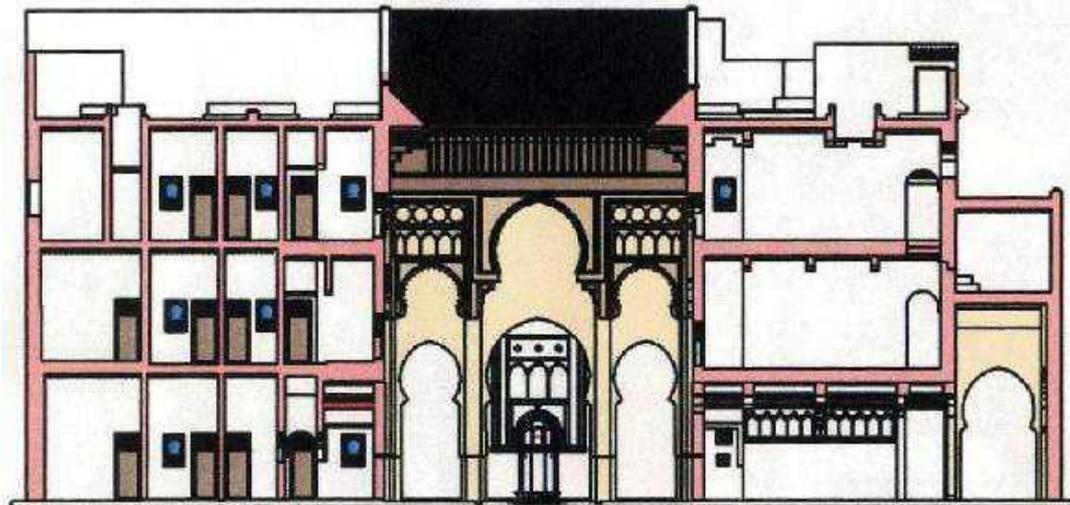


On applique sur le modèle numérique le même mouvement sismique que le prototype, et on compare la distribution des contraintes en fonction du type de connexion murs-plancher, avec les dégradations et les dommages subis par le prototype.

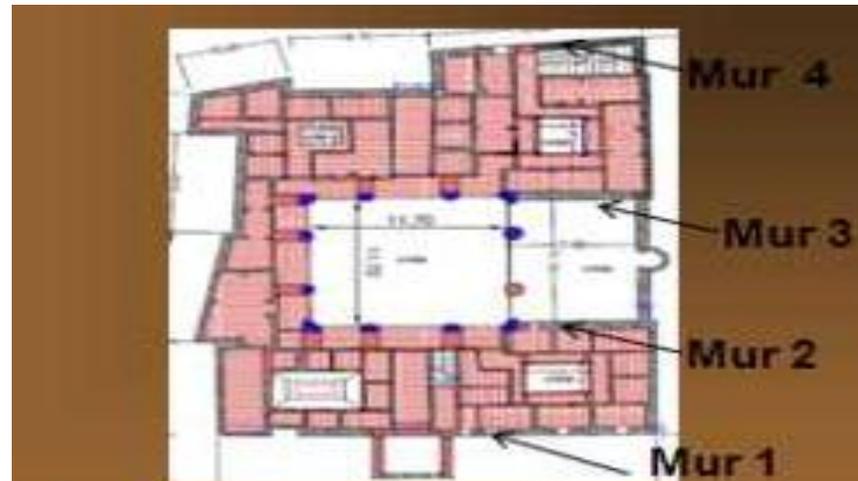


Vulnérabilité sismique

Médresa Ras Cherratine



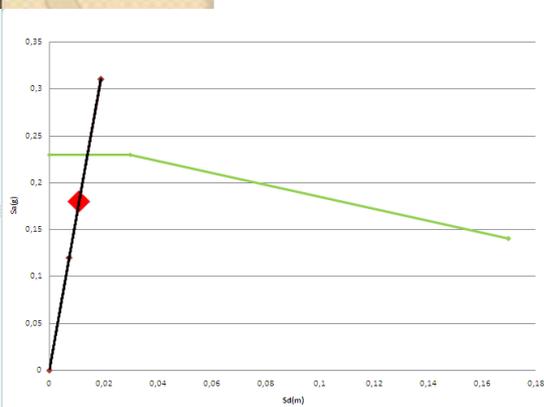
Murs calculés: Y Direction



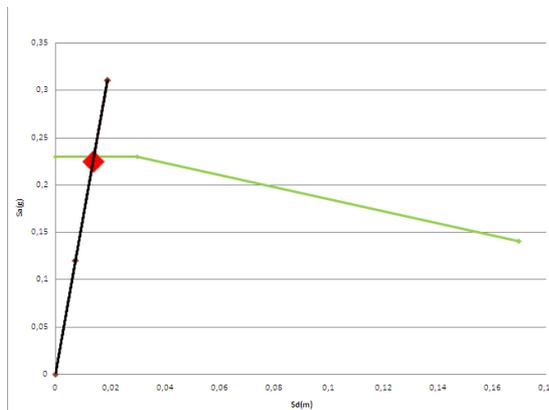
Murs calculés: X Direction

Vulnérabilité sismique (Analytique)

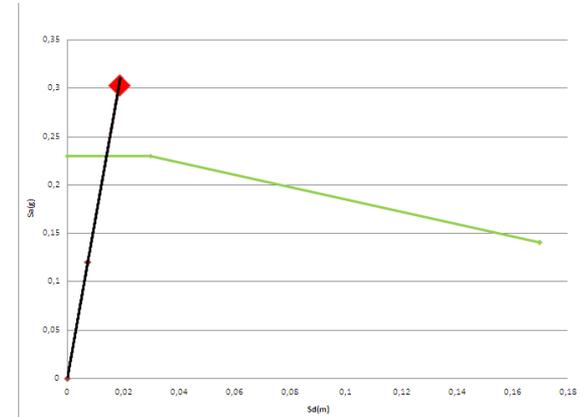
Médersa Ras Cherratine



**Point de déplacement
suivant X
Accélération 10%g**



**Point de déplacement
suivant X
Accélération 18%g**



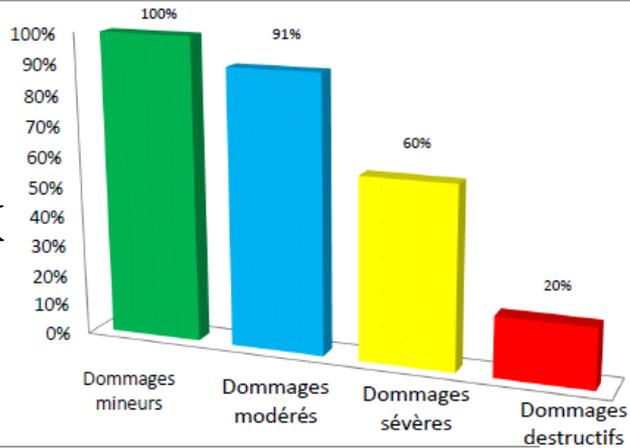
**Point de déplacement
suivant X
Accélération 25%g**

Au delà de 18%g, la structure risque des dégâts importants dans les deux directions

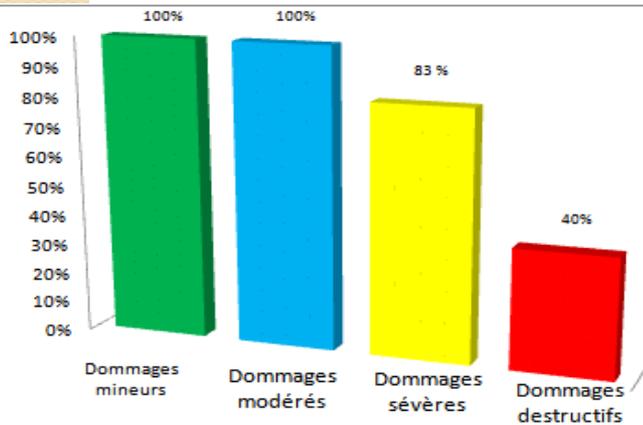
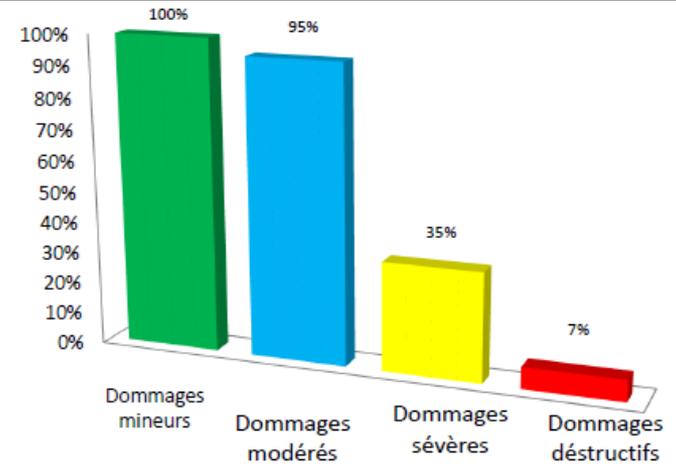
Vulnérabilité sismique (Analytique)

Médersa Ras Cherratine

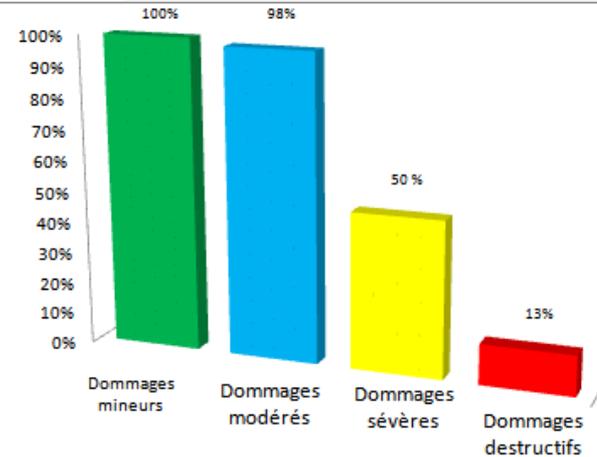
Risques
suivant X
10%g



Risques
suivant Y
10%g



Risques suivant X (25%g)

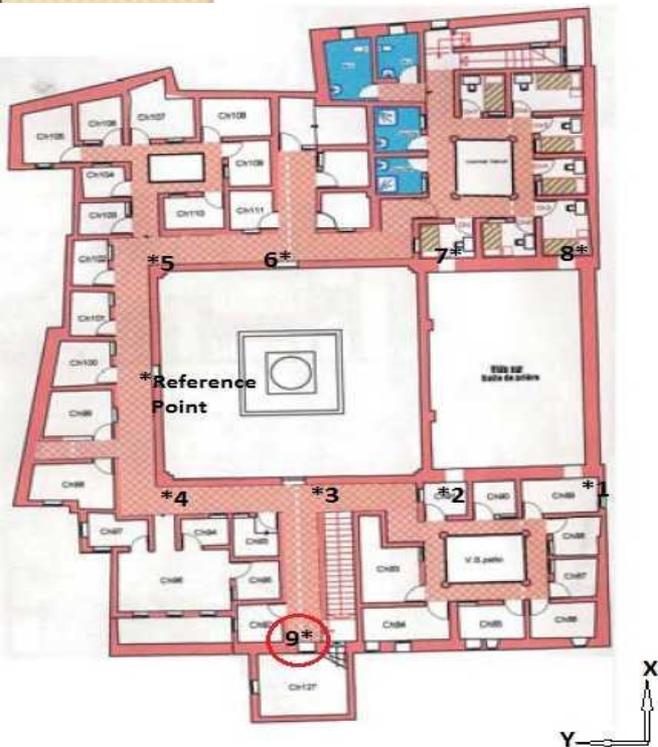


Risques suivant Y (25%g)

Vulnérabilité sismique (Tests dynamiques)

Médersa Ras Cherratine

Mesures expérimentales des fréquences propres avec accéléromètres piézoélectriques dans le cadre du projet NIKER en 2012:



(a)



(b)



(c)



(d)

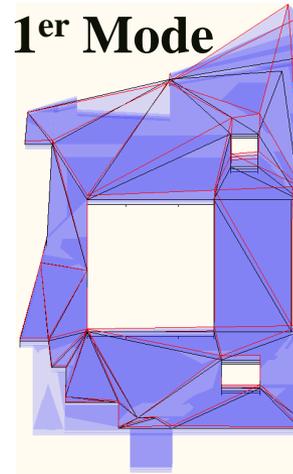
Vulnérabilité sismique (Tests dynamiques)

Médersa Ras Cherratine

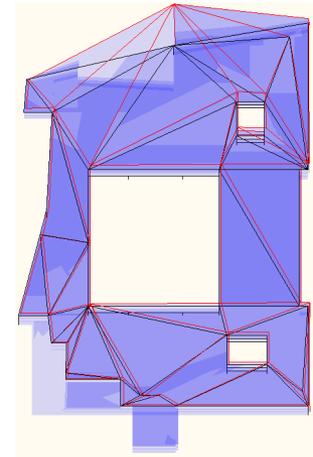
Résultats expérimentaux: 4 Hz, 10 Hz et 20 Hz

| 1er jour de mesures | | | | 2ème jour de mesures | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|
| Mesure no. | Mode 1 | Mode 2 | Mode 3 | Mesure no. | Mode 1 | Mode 2 | Mode 3 |
| 1 | 3,987 | 10 | 20 | 8 | 3,963 | 10,01 | - |
| 2 | 3,925 | - | - | 9 | 3,925 | - | - |
| 3 | 3,963 | 10 | 20 | 10 | 3,963 | - | - |
| 4 | 4,025 | 9,7 | 20,01 | 11 | 3,912 | 10,64 | - |
| 5 | - | 9,988 | 20 | 13 | 3,987 | 9,438 | - |
| 7 | 3,975 | 10,01 | - | 14 | 3,975 | 10,5 | - |
| | | | | 16 | 3,975 | - | - |
| Moyenne de toute les mesures | 3,975 | 9,988 | 20 | Moyenne de toute les mesures | 3,975 | 9,313 | 20 |

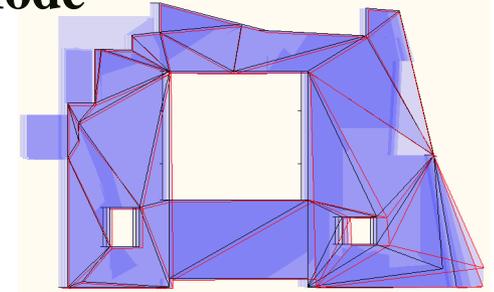
1^{er} Mode



2^{ème} Mode

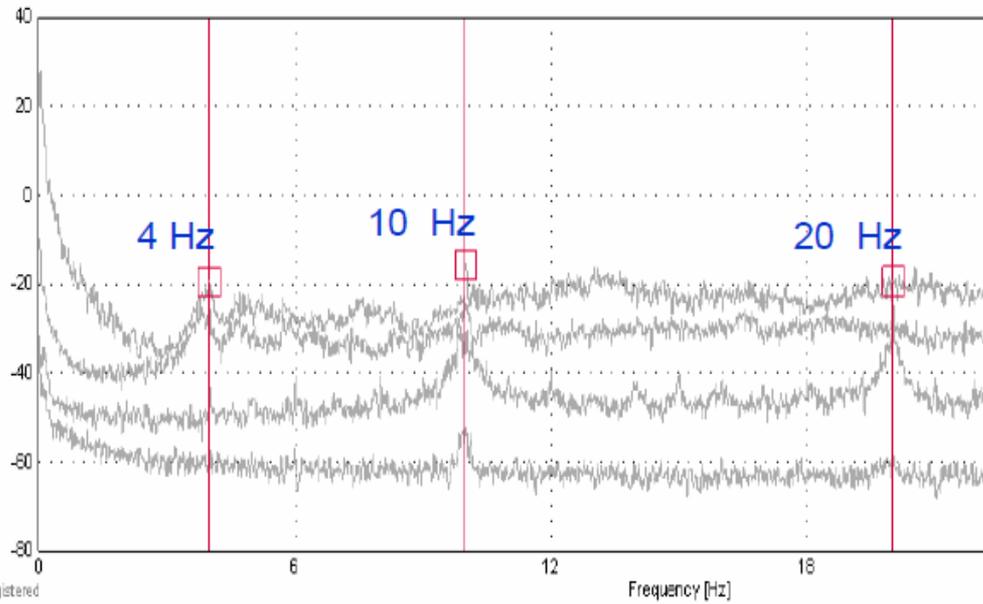


3^{ème} Mode



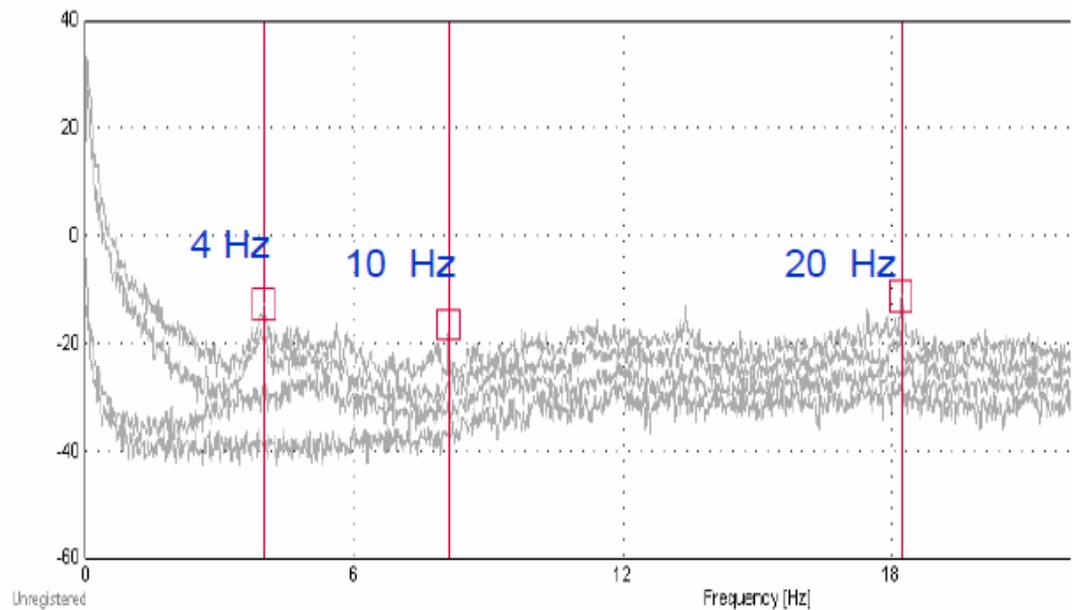
[dB] (1E-6 m/s²) / Hz

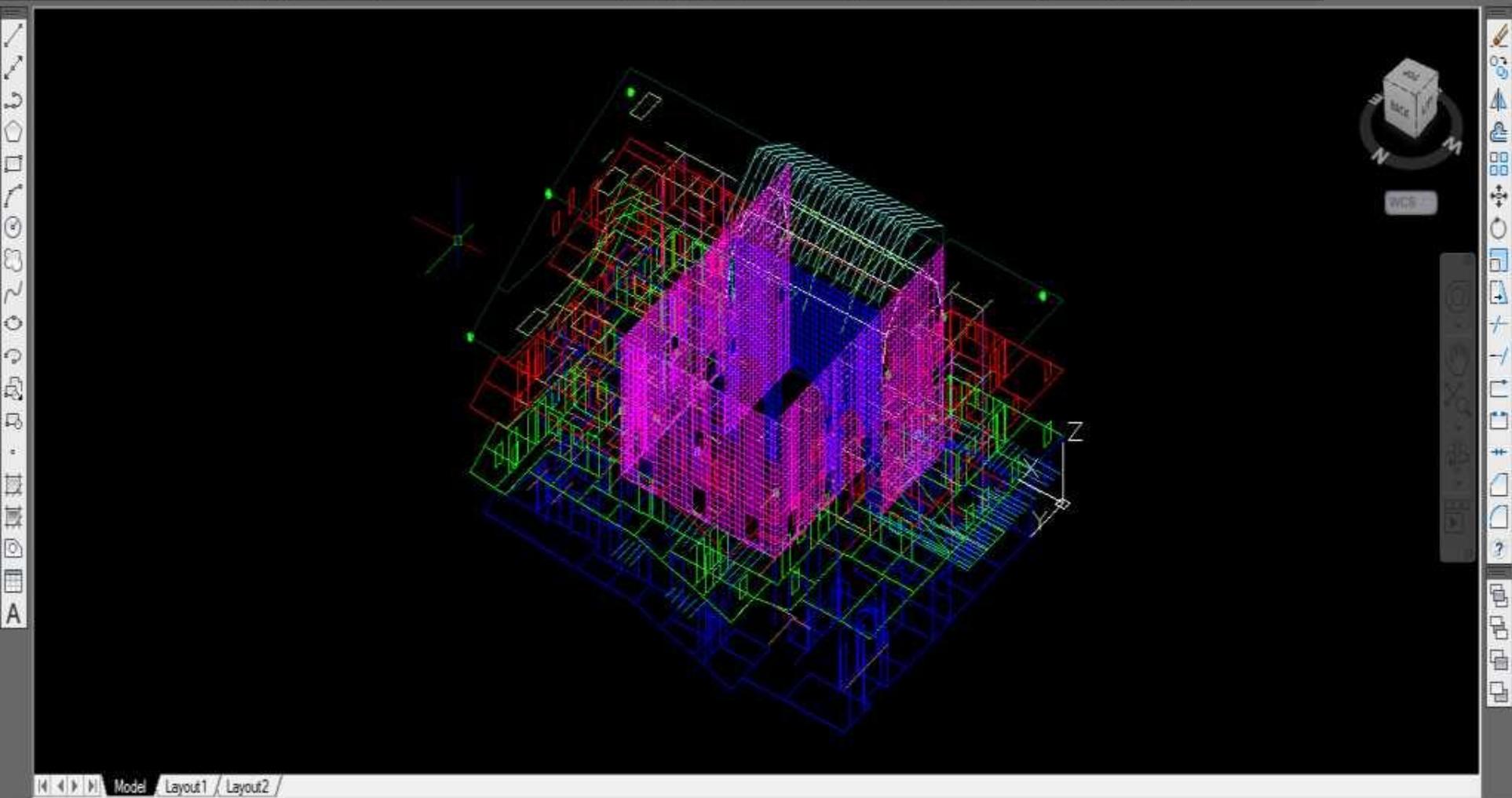
Frequency Domain Decomposition - Peak Picking
Singular Values of Spectral Density Matrices
of Test Setup: Setup 07



[dB] (1E-6 m/s²) / Hz

Frequency Domain Decomposition - Peak Picking
Singular Values of Spectral Density Matrices
of Test Setup: Setup 19



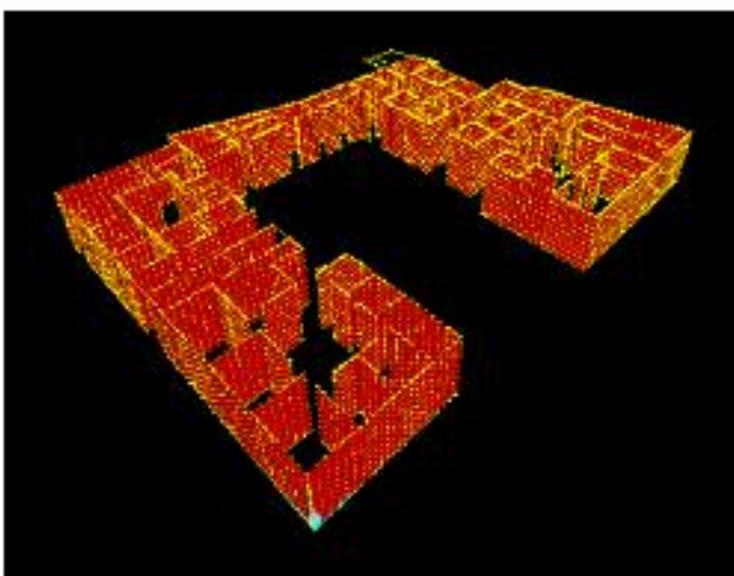


Specify corner of window, enter a scale factor (nX or nXP), or
[All/Center/Dynamic/Extents/Previous/Scale/Window/Object] <real time>: e

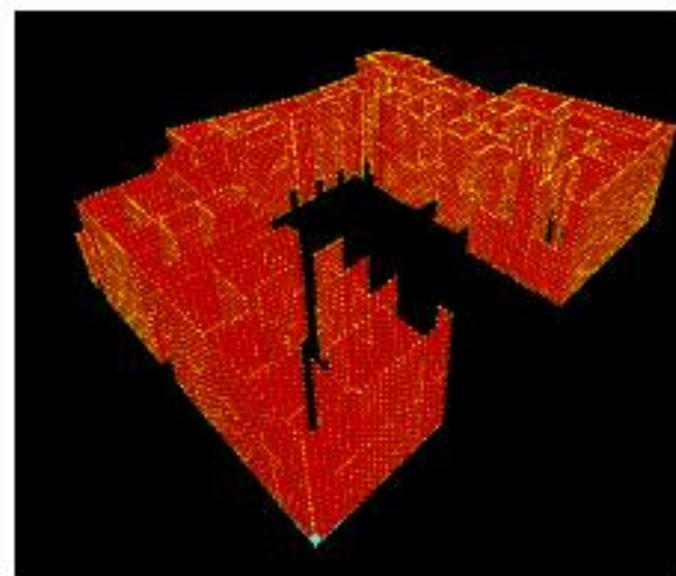
Command:

47.0720, 4.4887, 0.0000

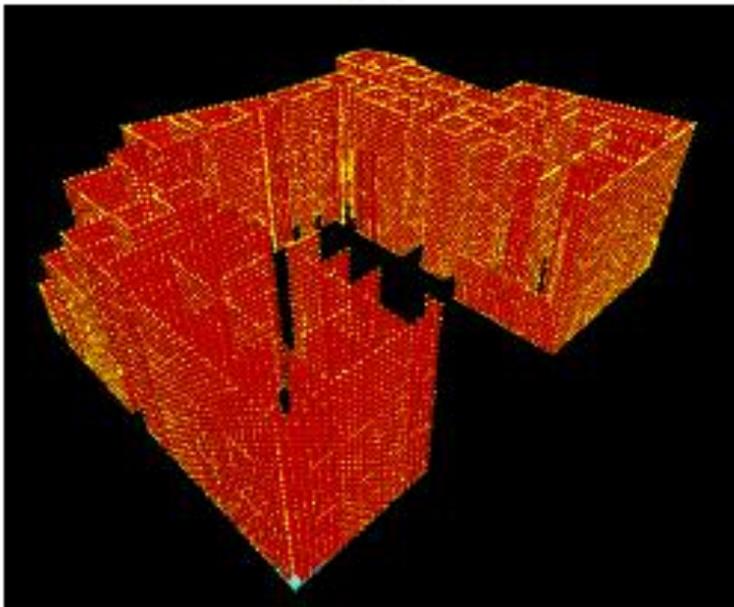
MODEL 1:1



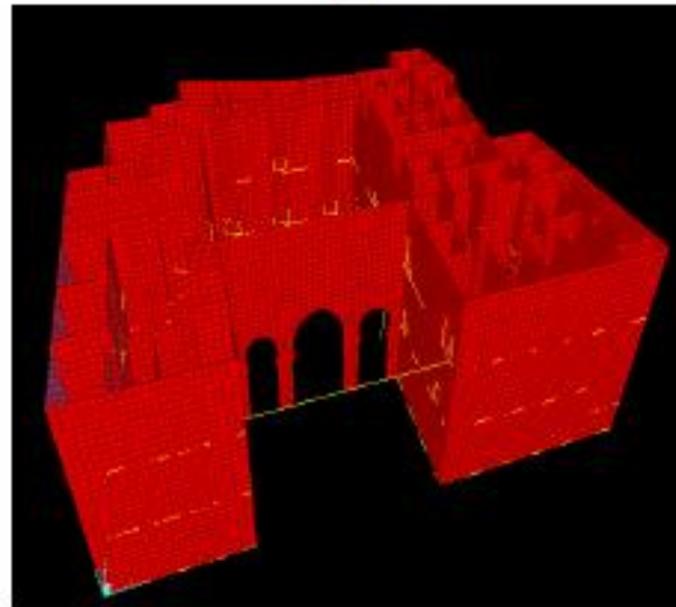
(a)



(b)



(c)



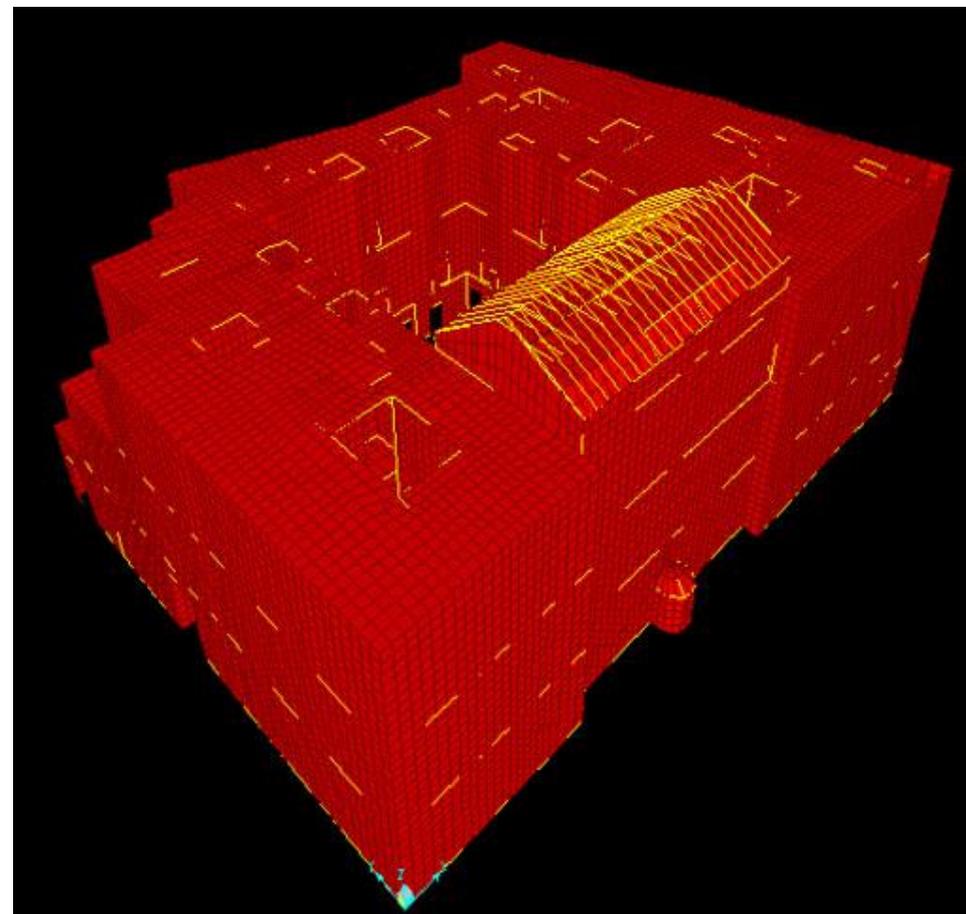
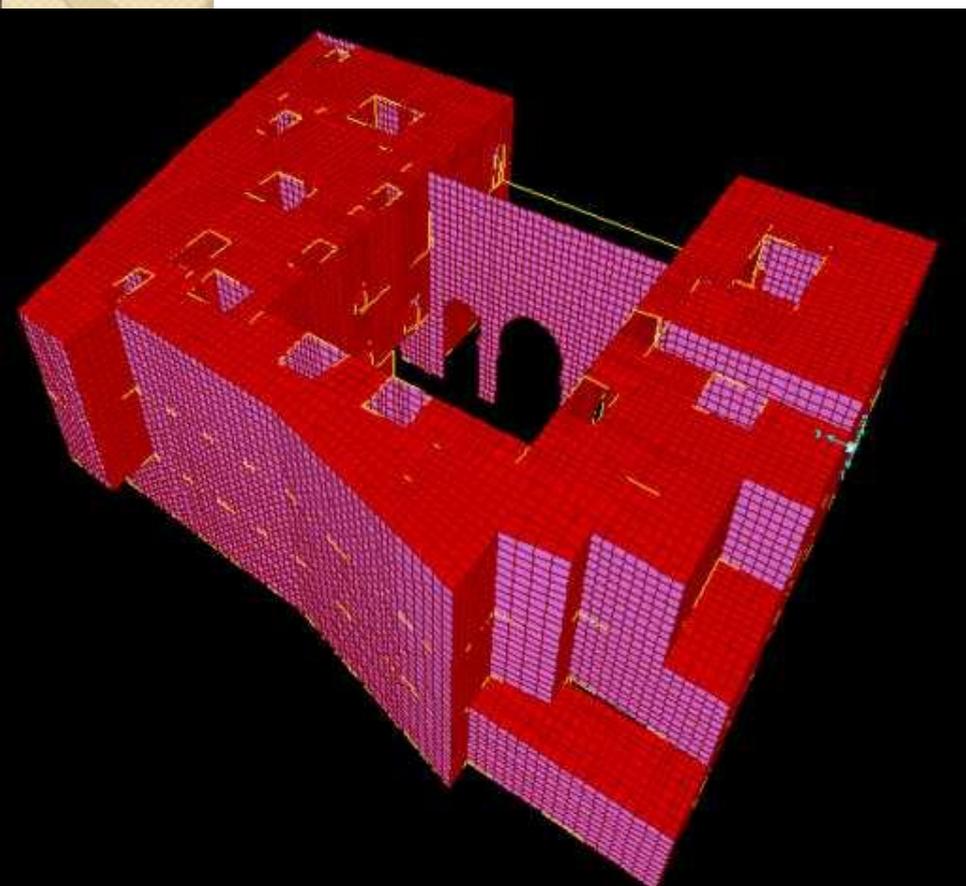
(d)

Phases de création du model: (a) RDC; (b) 1^{er} étage; (c) 2^{ème} étage; (d) murs et arches

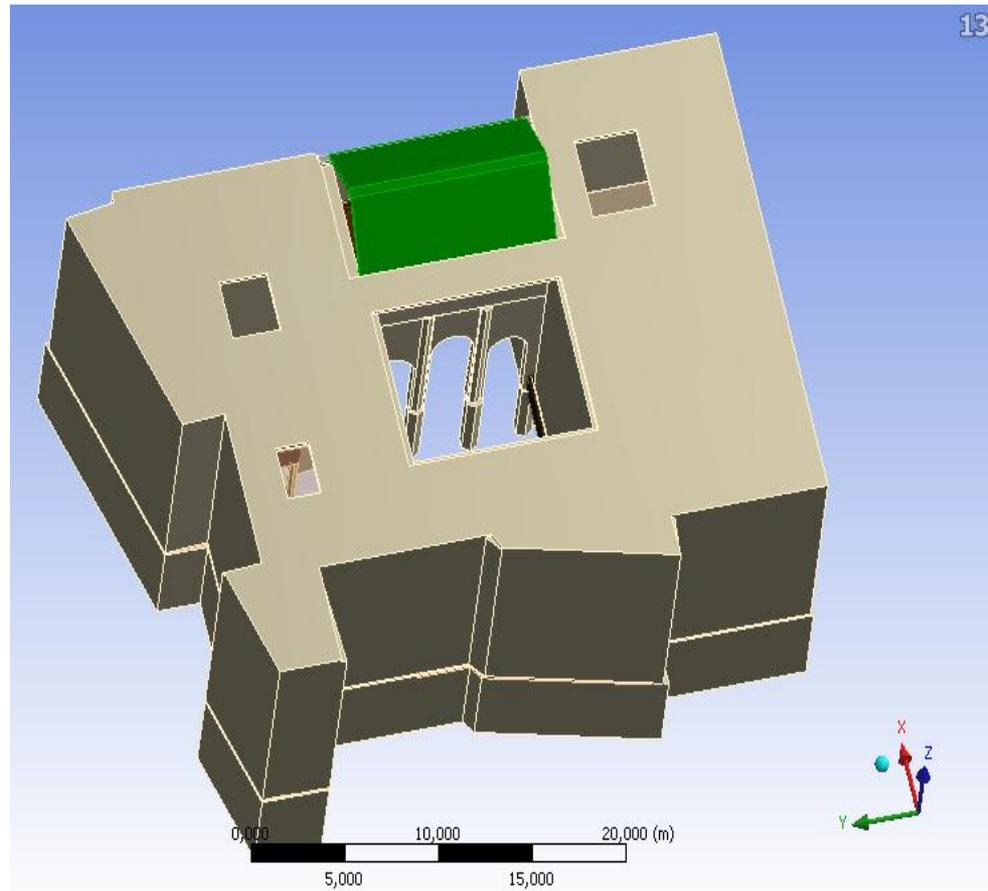
Vulnérabilité sismique (Modélisation numérique:

3D AutoCAD → SAP2000)

Médersa Ras Cherratine



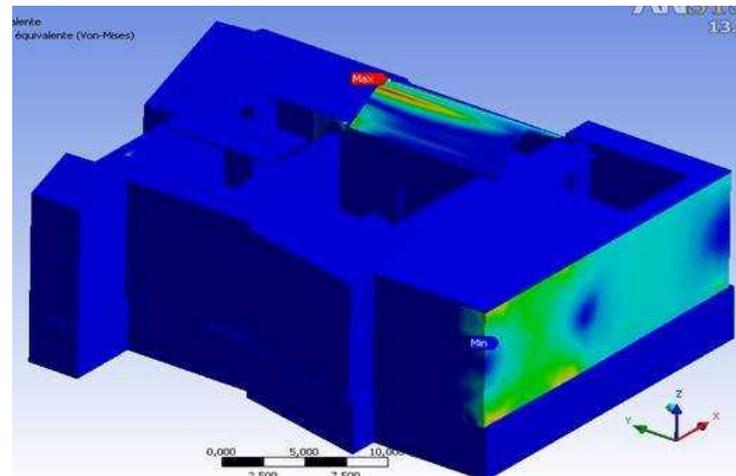
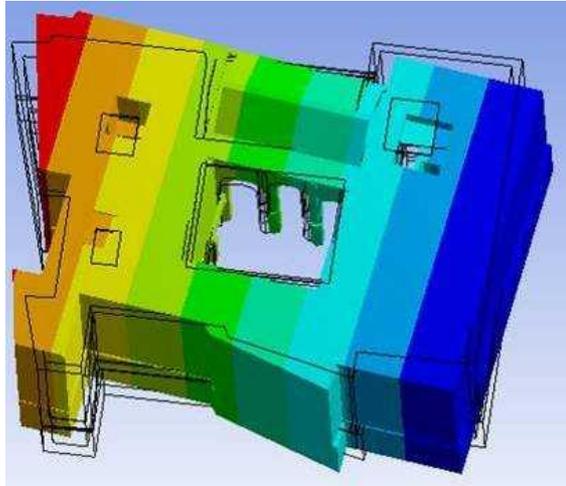
Vulnérabilité sismique (Modélisation numérique: 3D ANSYS) Médersa Ras Cherratine



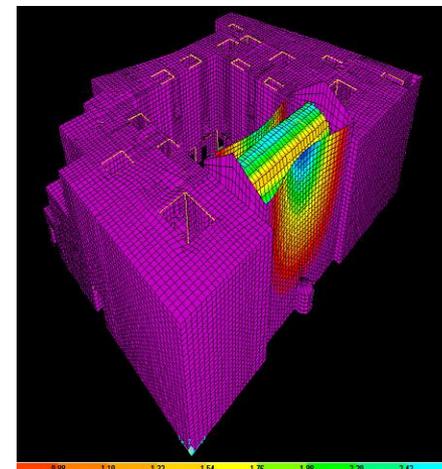
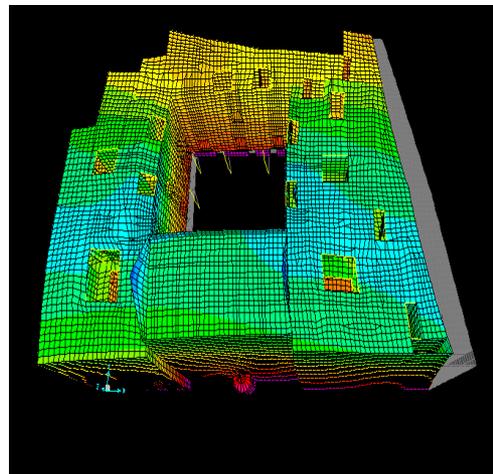
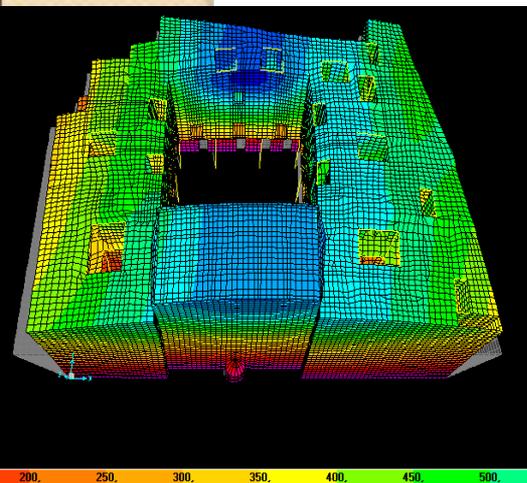
Vulnérabilité sismique (Modélisation numérique)

Médersa Ras Cherratine

Résultats de la Modélisation : analyse modale, dynamique et pushover



ANSYS



SAP 2000

Vulnérabilité sismique

Médersa Ras Cherratine

Comparaison des Fréquences obtenues en fonction de l'approche :

Calcul manuel
« analyse Pushover »

- 2Hz suivant la direction X
- 1,88Hz suivant la direction Y

Calcul manuel
« analyse dynamique »

- 1^{er} mode : 1,74Hz
- 2^{ème} mode : 23,75H

Calcul informatique :
« ANSYS »

- 1^{er} mode : 4,23Hz
- 2^{ème} mode : 10,28Hz
- 3^{ème} mode : 13,46Hz

Calcul informatique :
« SAP 2000 »

- 1^{er} mode : 3,94Hz
- 2^{ème} mode : 4,30Hz
- 3^{ème} mode : 4,93Hz

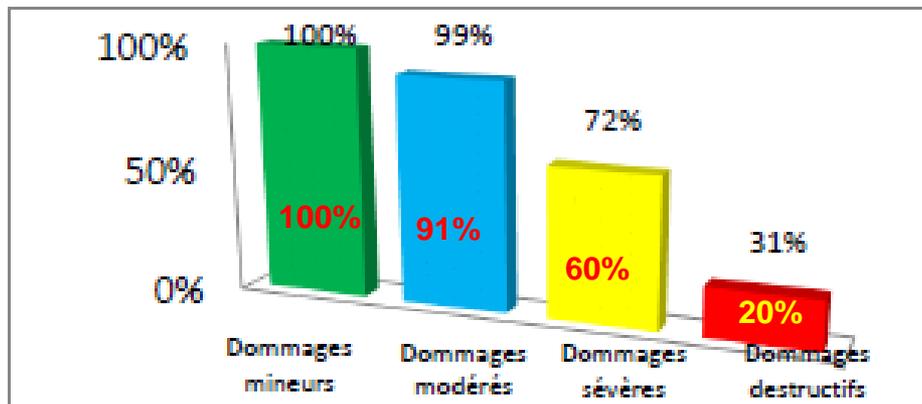
Mesure expérimentale
« accéléromètre »

- 1^{er} mode : 4Hz
- 2^{ème} mode : 10Hz
- 3^{ème} mode : 20Hz

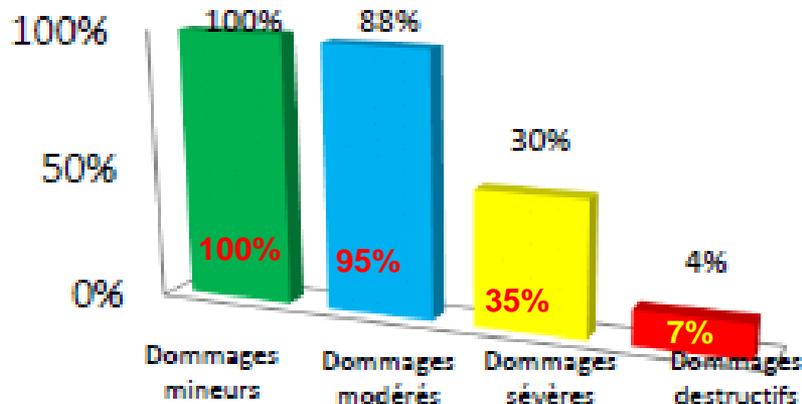
Vulnérabilité sismique

Médersa Ras Cherratine

Risques de dommages obtenus par modélisation numérique par ANSYS, comparés avec calcul manuel :



suivant X
10%g



suivant Y
10%g

Vulnérabilité sismique (Modélisation numérique avec ANSYS avant et après intervention)

Médersa Ras Cherratine

| Etude de cas | Renforcement proposé | Résultats avant renforcement | | | Résultats après renforcement | | |
|------------------------|--|------------------------------|------------------|---------------------------|------------------------------|------------------|---------------------------|
| | | Période (s) | Déplacement (cm) | % dommages sévères (10%g) | Période (s) | Déplacement (cm) | % dommages sévères (10%g) |
| Médersa Ras Cherratine | - Chemisage - chaînage - tirant et ancrage | 0,25 | 2,33 | 72 | 0,20 20% | 2,11 10% | 62 14% |

| Etude de cas | Renforcement proposé | Résultats avant renforcement | | | Résultats après renforcement | | |
|------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | Contrainte σ_{xx} (MPa) | Contrainte σ_{yy} (MPa) | Contrainte σ_{xy} (MPa) | Contrainte σ_{xx} (MPa) | Contrainte σ_{yy} (MPa) | Contrainte σ_{xy} (MPa) |
| Médersa Ras Cherratine | - Chemisage - chaînage - tirant et ancrage | 12,1 | 15,4 | 11,2 | 8,2 33% | 9,6 38% | 7,3 35% |