

SÉISME DU 8 SEPTEMBRE 2023 AL HAOUZ, MAROC



Swiss Society for Earthquake Engineering and Structural Dynamics
Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik

Société Suisse du Génie Parasismique et de la Dynamique des Structures
Società Svizzera di Ingegneria Sismica e Dinamica Strutturale

SÉISME DU 8 SEPTEMBRE 2023

AL HAOUZ, MAROC

RAPPORT DE LA MISSION DE RECONNAISSANCE DU 23-27 NOVEMBRE 2023

Volume n° 4 des documentations de la SGEB

AUTEURS

Afifa Imtiaz	Dr., Service Sismologique Suisse (SED), ETH Zürich
Eric Lattion	Lattion Bruchez Ingénieurs SA, Collombey-Muraz
Gustavo Cortés	Dr., Exigo Expertises SA, Ecublens
Hamza Sehaqui	Editech SA, Ayent – chef de mission
Meriton Beqiraj	Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge
Mylène Devaux	Prof. Dr., Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR)
Savvas Saloustrós	Dr., Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)
Yuhan Zhu	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)

IMPRESSUM

SGEB
Société Suisse du Génie Parasismique et de la
Dynamique des Structures, CP, CH-8093 Zurich

PHOTO DE COUVERTURE

La photo de couverture montre un bâtiment endommagé dans la ville de Talat N'Yaaqoub suite au séisme d'Al Haouz du 8 septembre 2023. (Photo : M. Beqiraj, Talat N'Yaaqoub)

COPYRIGHT

Copyright © 2024 by SGEB Zürich
Licence photos CC BY-SA. La citation du
présent rapport et le crédit de l'auteur de la
photo doivent être inclus.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.11066140>

CITATION

Rapport de la mission de reconnaissance SGEB,
Séisme du 8 septembre 2023, Al Haouz, Maroc.
M. Beqiraj, G. Cortés, M. Devaux, A. Imtiaz,
E. Lattion, S. Saloustrós, H. Sehaqui et Y. Zhu,
2024, SGEB.



Swiss Society for Earthquake Engineering and Structural Dynamics
Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik

Société Suisse du Génie Parasismique et de la Dynamique des Structures
Società Svizzera di Ingegneria Sismica e Dinamica Strutturale

Table des matières

1. Introduction	5
1.1 Contexte et objectifs de la mission	5
1.2 Remerciements	6
1.3 Déroulement du séminaire et de la mission	7
1.4 Informations générales	8
2. Seismology and site	10
2.1 Background	10
2.2 Seismicity and Seismotectonics of Morocco	10
2.3 Observed ground motion	13
2.4 Signs of potential site effects	16
2.5 Conclusion	22
3. Post-sismique	23
3.1 Introduction	23
3.2 Contexte post-sismique de la mission	24
3.3 Evaluation des bâtiments après un séisme : « Conseils sur l'utilisabilité des bâtiments »	25
3.4 Mesures de première urgence	30
3.5 Conclusion	34
4. Bâtiments en béton armé et maçonnerie	35
4.1 Bâtiments récents en zone périurbaine	35
4.2 Bâtiments en zone rurale	35
4.2.1 Caractéristiques	35
4.2.2 Dégâts observés dans les structures hybrides béton – maçonnerie	38
4.2.3 Dégâts particuliers	44
4.3 Autres ouvrages en béton	46
4.4 Conclusion	47
5. Stone masonry buildings	48
5.1 Structural characteristics	48
5.1.1 Vernacular stone masonry buildings	48
5.1.2 Structural variations of stone masonry structures	49
5.2 Seismic damage	50
5.2.1 Vernacular stone masonry structures	50
5.2.2 Presence of reinforced concrete elements	51
5.2.3 Presence of modern floors	54
5.2.4 Vertical extensions	56
5.3 Conclusion	58
6. Earthen buildings	59
6.1 Structural characteristics of vernacular earthen buildings	59
6.2 Seismic damage	61
6.2.1 Vernacular earthen structures	61
6.2.2 Vertical extensions in earthen structures	66
6.3 Conclusion	67

7. Bâtiments transformés (hybrides)	68
7.1 Introduction	68
7.2 Dommages sismiques observés	68
7.3 Conclusion.....	71
8. Bâtiments historiques	72
8.1 Introduction	72
8.2 Bâtiments sacrés	72
8.3 Palais de la Bahia.....	79
8.4 Bâtiments de la Médina de Marrakech	80
8.5 Conclusion.....	81
9. Conclusions	82
10. Références	84

1. Introduction

Hamza Sehaqui

1.1 Contexte et objectifs de la mission

Le 8 septembre 2023 à 22h11, heure locale Marocaine (UTC+1), un séisme de magnitude $M_w \approx 7$ à une profondeur estimée entre 10.7 km à 24 km s’est produit dans le Haut Atlas Marocain (Figure 1-1), à environ 80 km au sud de Marrakech (31°03'46"N 8°16'02"W). Le bilan des autorités fait état de plus de 2900 morts et 5600 blessés.

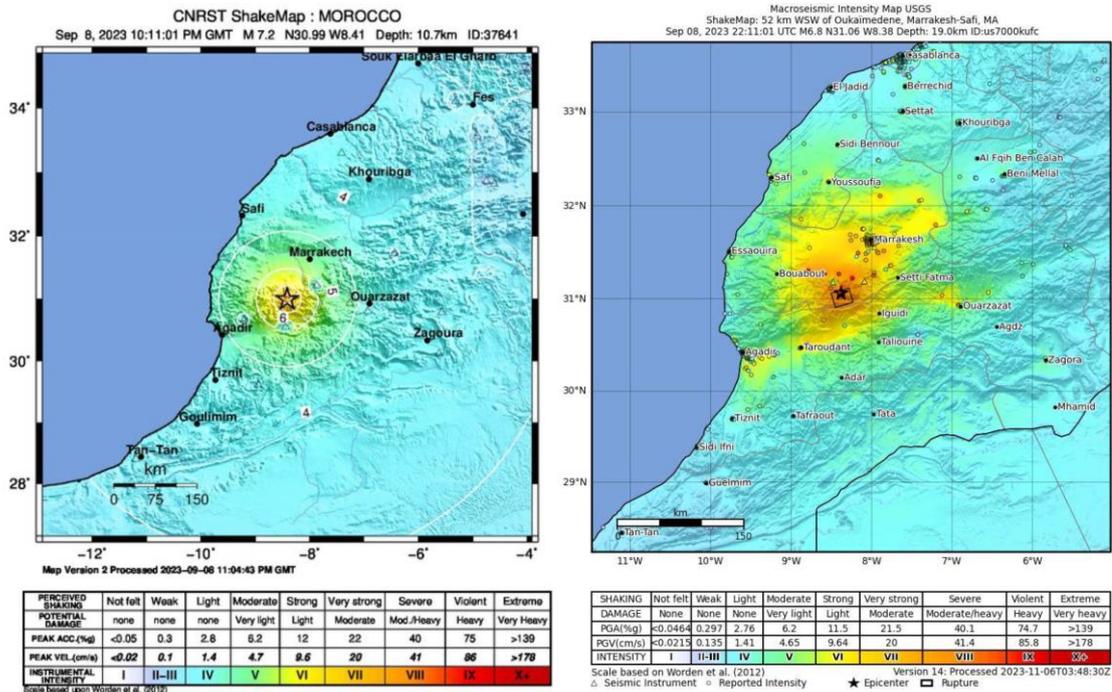


Figure 1-1 : ShakeMap du séisme d'Al Haouz selon le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST), Maroc et l’Institut d’études géologiques des Etats-Unis (USGS).

Avant cet évènement, le Maroc et la Suisse ont vécu des tremblements de terre de magnitude similaire (Agadir en 1960, $M_w=5.7$ et Sierre en 1946, $M_w = 5.8$). La Suisse se préparant pour un séisme majeur, l’organisation d’une mission de reconnaissance à la suite du séisme d’Al Haouz revêt un grand intérêt. Les deux pays ont des normes prescrivant des accélérations maximales du sol (PGA) comparables (Règlement de construction Parasismique Marocain RPS 2000 (RPS 2000, 2011) $a_{gd,max,RPS2000} = 18\% g$ et norme Suisse SIA 261 (SIA, 2020) $a_{gd,max,SIA261} = 16\% g$, Figure 1-2).

Dans ce contexte, la Société Suisse du Génie Parasismique et de la Dynamique des Structures (SGEB) a décidé d’envoyer une délégation pour une mission post-sismique dans les zones sinistrées du Haut Atlas au Maroc. L’objectif principal étant :

- L’analyse des aspects sismologiques et géologiques.
- L’évaluation des dégâts provoqués par le séisme d’Al Haouz sur les différents types de structures.
- L’échange avec les collègues marocains sur la gestion post-sismique de l’évènement.

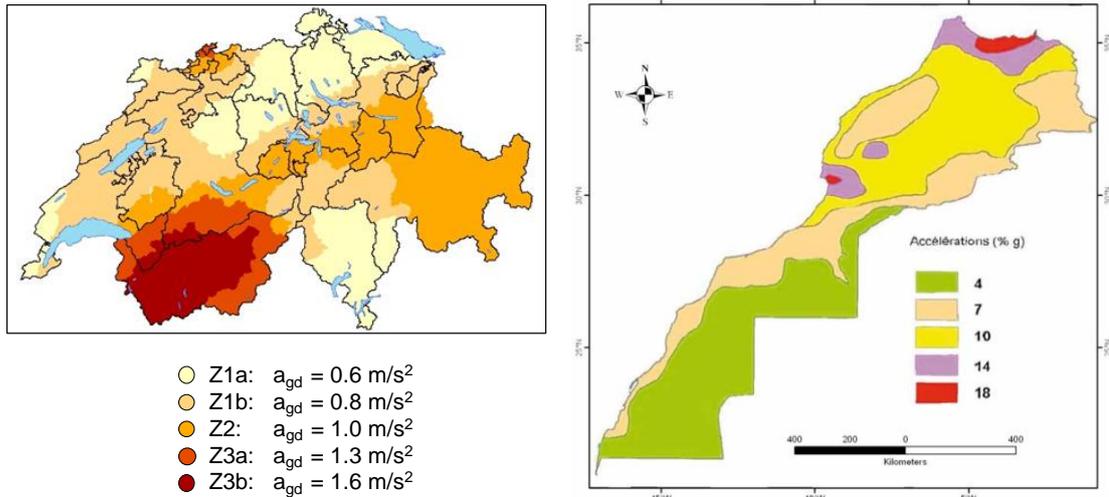


Figure 1-2 : Accélération horizontales a_{gd} par zone sismique en Suisse (selon la SIA 261) et au Maroc (selon le RPS2000).

L'équipe de la SGEB a été accueillie par des membres du programme « Rebuild »¹ et de l'Université Mohammed VI Polytechnique de Benguerir (UM6P).

1.2 Remerciements

La mission n'aurait pas pu se dérouler sans l'aide précieuse de plusieurs collègues et organismes que nous tenons à remercier, notamment :

- Monsieur Hassan Kaddouri, directeur du programme « Rebuild » et Monsieur Khalid Amrouch, Professeur à l'UM6P et à l'université Adelaïde pour leurs efforts dans l'organisation et la réussite de cette manifestation. Un très bon accueil a été réservé aux membres de la SGEB. Leur retour d'expérience et leur assistance logistique ont été indispensables pour la réalisation de cette mission de reconnaissance dans les meilleures conditions.
- Notre présidente Madame Pia Hannewald, pour sa coordination à l'organisation de la mission et son suivi essentiel, ainsi que Prof. Katrin Beyer pour ses conseils avérés.
- Son Excellence, Monsieur Guillaume Scheurer, et son équipe de l'ambassade de Suisse au Maroc pour leur précieux soutien.
- Monsieur Abdeslem Yahyaoui et Monsieur Youssef El Bouhali pour leur accompagnement dans les zones sinistrées et pour l'organisation des moyens logistiques nécessaires à la réalisation de cette mission.
- Monsieur Abdelilah Zertiti et Madame Meryem Mernissi de l'association EPFL Alumni Maroc et Monsieur Houssine Sehaqui de l'UM6P pour leur disponibilité et leur soutien.
- Enfin et non des moindres, la population des régions visitées pour leur accueil et leur générosité. Ils se sont toujours rendus disponibles pour répondre à nos interrogations et pour partager leur vécu vis-à-vis de ce tremblement de terre.

¹ Le programme « Rebuild » est une initiative mise en place par l'OCP, groupe industriel marocain, pour participer à la gestion post-sismique dans les régions affectées à la suite du séisme d'Al Haouz.

1.3 Déroulement du séminaire et de la mission

La tenue de la mission de reconnaissance a été validée par la SGEB le 25.10.2023 et la période choisie pour la réaliser a été fixée du 23.11.2023 au 27.11.2023 selon le planning résumé dans le Tableau 1-1. A des fins d'échanges scientifiques et techniques avant la réalisation de la mission dans les zones sinistrées, un séminaire a été organisé le 23.11.2023 à l'UM6P par Monsieur Hassan Kaddouri et par Monsieur Khalid Amrouch. Ce séminaire a accueilli un panel de participants du:

- Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRS) ;
- Ministère de la transition énergétique et du développement écologique ;
- Institut Scientifique de Rabat ;
- Ecole Hassania des Travaux Publics (EHTP) ;
- Université Chouaib Doukkali.

Les présentations suivantes ont été données :

- Séisme d'Al Haouz : contexte sismologique et géologique au Maroc, par Monsieur Nacer Jabour, chef de division de l'Institut National de Géophysique (ING, CNRS).
- Programme « Rebuild » et rôle du groupe OCP (anciennement Office Chérifien du Phosphate) et de l'UM6P dans la gestion post-sismique du tremblement de terre d'Al Haouz, par Monsieur Hassan Kaddouri.
- Contexte sismique en Suisse, vérification des structures existantes, stratégies de renforcement et gestion post-sismique, par la délégation de la SGEB.

Les discussions qui ont suivi les présentations ont permis de recueillir des informations utiles pour le bon déroulement de la mission de reconnaissance. Ce constat sur le terrain présentait une grande étendue des zones de dommages et une typologie de dégâts variée. Différentes villes et différents villages se situant entre 10 km et 70 km de l'épicentre ont été visités (Figure 1-3). A noter que lorsque la sécurité structurelle était jugée suffisante, l'accès à l'intérieur des bâtiments endommagés était possible.

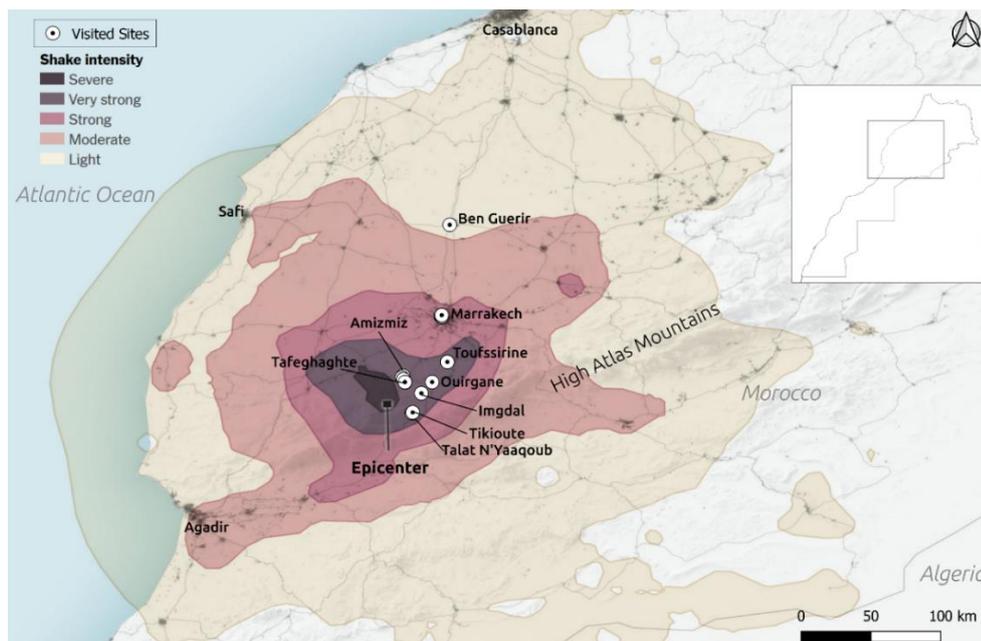


Figure 1-3 : Carte de Leatherby et al. (2023) recrée avec les zones sinistrées visitées.

Tableau 1-1 : *Planning de la mission de reconnaissance.*

Jeudi 23.11	Arrivée à l'aéroport de Marrakech-Ménara et transfert à l'hôtel. Séminaire à l'UM6P de Benguérir.
Vendredi 24.11	Visite des villages de : Toufssirine (Distance épacentrale DE : 42 km) Baraka (DE : 25 km) Imgdal (DE : 15 km) Talat N'Yaaqoub (DE : 11 km) Tikioute (DE : 11 km)
Samedi 25.11	Visite d'une fabrique de briques et de poutrelles à hourdis. Visite des villages de : Amizmiz (DE : 18 km) Tafeghaghte (DE : 15 km)
Dimanche 26.11	Visite des monuments historiques et des sites endommagés de la vieille ville de Marrakech (DE : 68 km)
Lundi 27.11	Visite des monuments historiques et des sites endommagés de la vieille ville de Marrakech (DE : 68 km) Retour à l'aéroport de Genève.

1.4 Informations générales

Le tremblement de terre du 8 septembre 2023 au Maroc a été ressenti dans toutes les villes du Royaume, ainsi qu'au sud de l'Espagne et du Portugal, au sud-est de l'Algérie et au nord de la Mauritanie. La secousse principale a été suivie une vingtaine de minutes plus tard par une réplique $M_w=4.9^2$. Ce séisme, qui est le plus important tremblement de terre enregistré par les stations sismiques du pays, a provoqué des dégâts importants et l'effondrement de plusieurs bâtiments dans les villages proches de l'épicentre. La majorité des victimes ont été recensées dans la région d'Al Haouz et de Taroudant.

Historiquement, aucune mention d'un séisme d'une telle ampleur n'est signalée dans le Haut Atlas marocain. Les normes parasismiques marocaines (Figure 1-4) ne présentaient pas des accélérations se rapportant à un tel événement. Les deux normes marocaines en vigueur sont :

- Le RPS2000 qui s'applique principalement aux systèmes de portiques (cadres en béton armé avec ou sans remplissage en maçonnerie), de voiles et aux systèmes mixtes portiques/voiles.
- Le Règlement Parasismique de Constructions en terre RPCTerre 2011 s'applique aux constructions en adobe, pisé, bauge et moellons de pierres à mortier de terre. Selon cette norme, les constructions de ce type sont limitées à un maximum de 2 niveaux (voire 1 niveau dans les zones à accélérations élevées et si l'affectation est importante comme pour une structure scolaire).

² Réplique le 08.09.2023 à 22:30:44 (UTC) selon l'USGS.

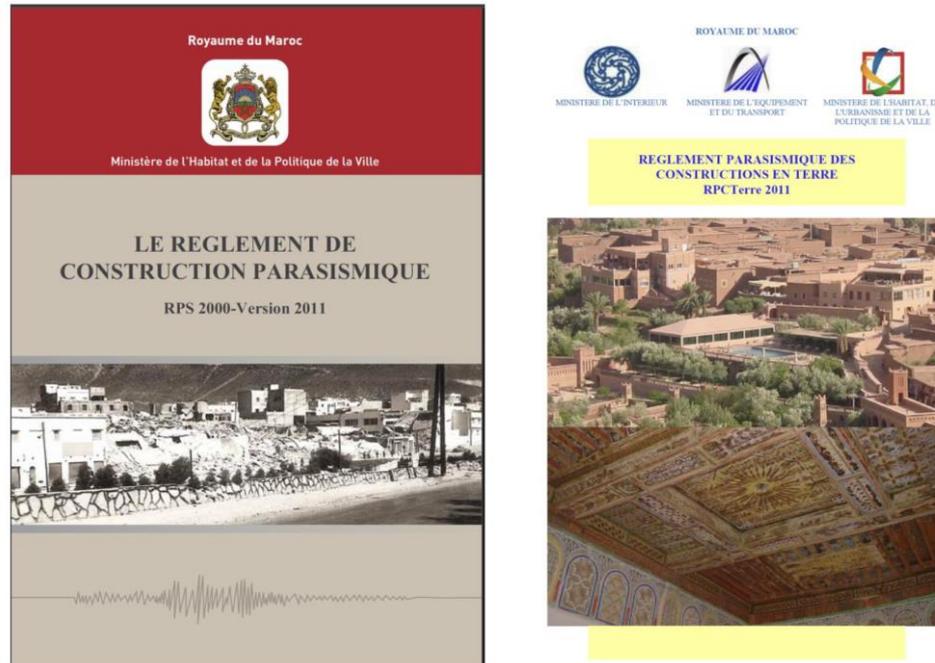


Figure 1-4 : Normes parasismiques marocaines - Règlement de construction parasismique (RPS) et Règlement parasismique des constructions en terre (RPCTerre).

A noter que lors de la mission de reconnaissance, ce sont principalement des constructions en pisé, moellons (Chapitre 5 et 6) et structures portiques (poteaux/poutres en béton armé, Chapitre 4) avec remplissage en maçonnerie qui ont été rencontrées. Les barrages et les ouvrages d'arts ne font pas l'objet du présent rapport. La Figure 1-5 montre une photo prise du village de Toufssirine.



Figure 1-5 : Photo prise du village de Toufssirine (crédit S. Saloustrós)

2. Seismology and site

Ajifa Imtiaz

2.1 Background

According to the United States Geological Survey (USGS), the September 8, 2023, Al Haouz earthquake, occurring in the western High Atlas Mountain range had a moment magnitude (M_w) of 6.8 and hypocentral depth of 26 km. Preliminary focal mechanism solutions and finite-fault models (USGS, 2023) suggest that it ruptured a 20–30 km section of an oblique-reverse fault with either a shallow dip striking to the southeast or a steep dip striking to the east. However, the specific fault responsible for the event has yet to be identified as the rupture did not reach the surface. This intraplate event took place within the North African plate, approximately 500 km from the boundary with the Eurasian plate, where seismic activity is relatively low (Figure 2-1). The earthquake was strongly felt in mountainous villages near the epicenter and caused significant damage to buildings. Shortly after the mainshock, a magnitude (M) 4.9 aftershock occurred approximately 20 minutes later, exacerbating the damage. In this section of our report, we examine the seismological and site-specific effects on the areas impacted by this earthquake that were visited by the SGEB team.

2.2 Seismicity and Seismotectonics of Morocco

Morocco, located at the junction of Africa and Europe, bears a complex and dynamic tectonic framework shaped by interactions between major tectonic plates. Figure 2-1 (Cheloni et al., 2024) illustrates the primary seismotectonic settings and seismicity in and around Morocco, delineating three key structural domains: the Rif, the Atlas Mountains, and the Anti-Atlas. The primary geological forces at play involve the northward convergence of the African (Nubian) plate with respect to the Eurasian plate in the Mediterranean region. This ongoing collision has given rise to the Rif mountain range and played a pivotal role in the creation of the Strait of Gibraltar. The convergence is taking place at a rate of 4–10 millimeters (mm) per year (yr) and is oblique relative to the plate boundary, making the northern part of Morocco prone to seismic activity, leading to significant earthquakes in the past.

In the southern region, Morocco experiences extension and rifting effects associated with the breakup of the supercontinent Pangea during the early Jurassic period (201 to 174 million years ago). This process gave rise to the expansive Atlas mountain range, stretching from Morocco's Atlantic coast near Agadir to the northeast, marking the southernmost zone of the Eurasia-Africa collision. The convergence of the North African plate with the Eurasian plate uplifted the mountains further during the Cenozoic period (66 million years to present). The ongoing collision extends to the southern edge of the plate boundary, resulting in shortening in the High Atlas Mountains region, evidenced by the 2023 Al Haouz event. GPS observations (Chalouan et al., 2023; Koulali et al., 2011) indicate active deformation along the High Atlas, accommodating a shortening rate of about 1 mm/yr. This compressional motion causes significant friction between plates, leading to faults with reverse and strike-slip motion, consistent with the focal mechanism solution of the Al Haouz event (Figure 2-1). However, the relatively slower deformation indicates that stress accumulation in this region requires longer periods compared to the north to generate earthquakes of similar magnitude. The faults in this area have been moving for a long time, going back a few million years, and are associated with the formation of folds in the Atlas Mountains foreland (Aït Brahim et al., 2002). The presence of a complex network of such active faults explains the seismicity in this area. Some researchers suggest a unique lithosphere thinning process combined with anomalous mantle

uplift at the Atlas Mountains, potentially leading to large magnitude earthquakes (Chalouan et al., 2023; Michard et al., 2008).

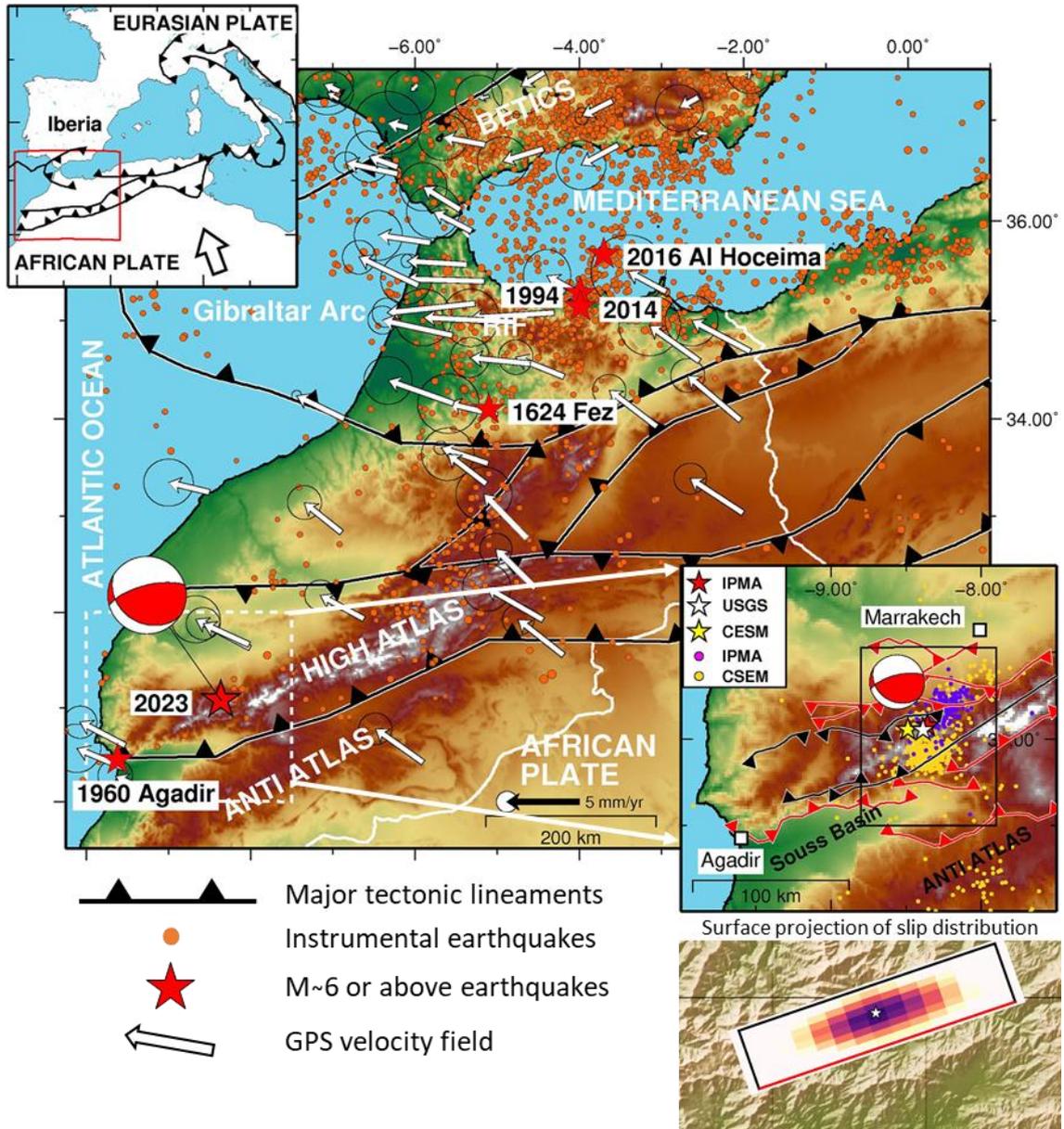


Figure 2-1 : Seismotectonic settings and seismicity in and around Morocco, modified after Cheloni et al. (2024). Upper-left inset: tectonic sketch of the western Mediterranean region, indicating the area of the main figure marked by the red rectangle. Bottom-right inset: active faults in the epicentral area of the 2023 Al Haouz event; stars show the mainshock located by different agencies; circles show the aftershocks of the first month; beachball image shows the focal mechanism of the mainshock. Bottom-right: surface projection of slip distribution of the mainshock (USGS, 2023).

Historical records show that Morocco has experienced earthquakes with estimated magnitudes close to 6 or higher, such as those in 1624 in Fez and 1731 in Agadir, resulting in damage to cities like Fez, Meknes, Melilla, Tangier, and Agadir. The seismicity map (Figure 2-1,

Figure 2-2) highlights that the most active seismic zone is concentrated in the Rif Mountains and the Alboran Sea. More recent seismic events, including the Al Hoceima earthquakes in 1994, 2014, and 2016, with magnitudes ranging from Mw 6.1 to 6.5, caused significant damage and heightened awareness of seismic risks in the region. Focal mechanisms suggest a prevalence of reverse faulting along the Algerian margin, transitioning to predominant strike-slip mechanisms farther westward (Michard et al., 2008). Seismic activity is typically shallow, occurring within the first 30 km depth, although intermediate seismicity (at depths of 40–150 km) is observed in the eastern part of the Gibraltar Strait.

Seismic activity south of the Mediterranean area is relatively limited and primarily concentrated within a narrow, northeast-to-southwest trending zone spanning the Middle Atlas, the Central High Atlas, and parts of the western Anti-Atlas. Although earthquakes in this region tend to be less frequent and of smaller magnitude (typically $M < 5$) compared to those along the plate boundary, several significant seismic events have occurred. Among them, notable events include the 1960 Agadir earthquake (Mw 5.8) and two events in the easternmost Anti-Atlas (M 5.5). Earthquakes in this area typically occur at shallower depths and exhibit predominantly strike-slip or reverse mechanisms. The 1960 Agadir earthquake, which occurred near the boundary between the western High Atlas and the Anti-Atlas, resulted from activity along the South Atlas Fault, causing widespread destruction in Agadir and claiming 12,000–15,000 lives. The 2023 Al Haouz earthquake, the strongest instrumentally recorded seismic event in this region, proved to be the other damaging earthquake in Morocco's history. Additionally, an M 5.8 earthquake occurred nearby in 1955.

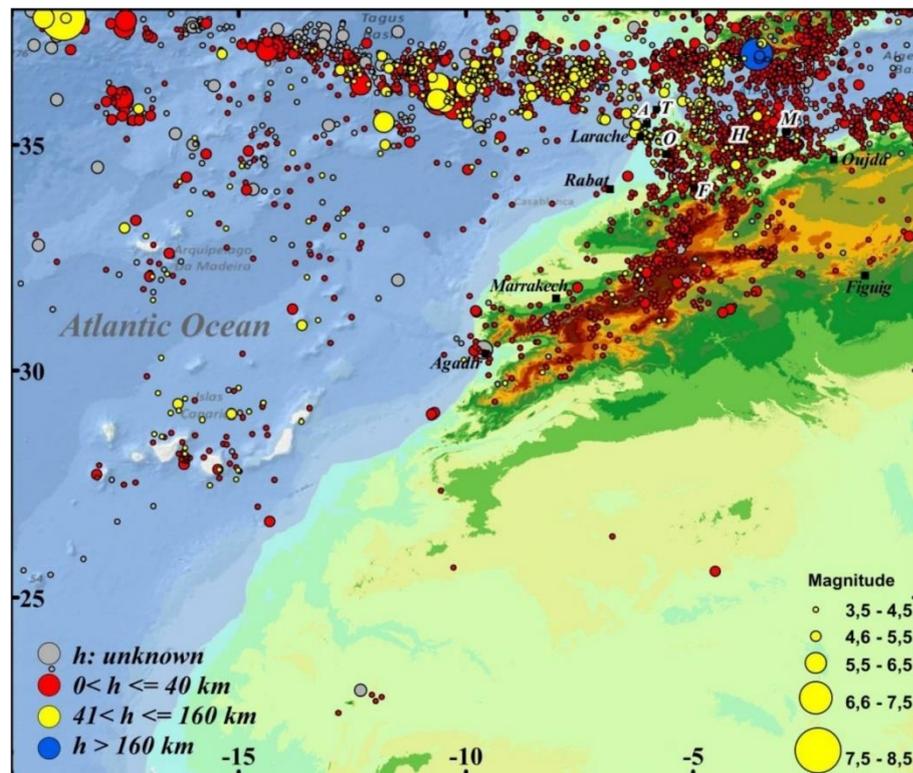


Figure 2-2 : Seismicity of Morocco and surrounding area from 1901 to 2010 with $M \geq 3.5$, after Cherkaoui and Hassani (2012). Abbreviations: A: Asilah, F: Fez, H: Al Hoceima, M: Melilla, O: Ouezzane, T: Tangier.

2.3 Observed ground motion

The USGS macroseismic intensity map (USGS,2023) shown in Figure 2-3 indicates that after the 2023 Al Haouz event, intensities V to VI, indicating middle to strong tremors and slight damage, were observed within a radius of approximately 150 km from the epicenter (e.g., Agadir). Closer to the epicenter (e.g., Amizmiz), intensity VIII was observed, indicating severe shaking with heavy damage. In Marrakech, intensities reaching up to VI were observed. Figure 2-4 displays the USGS-provided estimated peak ground acceleration (PGA) map of the event. On this map, we have marked the locations visited by the SGEB team, revealing that they lie within the 0.2 to 0.5 g PGA contours. In Figure 2-5, USGS compares observed ground motions (represented by circles and triangles) with those predicted by ground motion equations for soil (indicated by the purple boundary). Generally, the observations appear to surpass the predictions and show a broad decay with distance. Ground motion reached levels of up to 0.78 g at a seismic station located 30 km away from the epicenter, while the PGA reached up to 0.5 g in Marrakech. Figure 2-6 depicts the locations of several stations (see Tableau 2-1) from European networks that captured data on the Al Haouz earthquake and have made this data publicly available. Seismograms of one horizontal (east-west, EW) and the vertical components are displayed. The nearest station, Tiouine, situated approximately 100 km away from the epicenter, recorded a peak ground velocity (PGV) of 1.5 cm/s. Additionally, the seismograms also depict the occurrence of the first aftershock, with a magnitude of 4.9. Moving northward from Morocco through Spain and until Salève near Geneva, distinct phases of seismic wave arrivals, including P (primary), S (shear), and surface waves, become increasingly discernible.

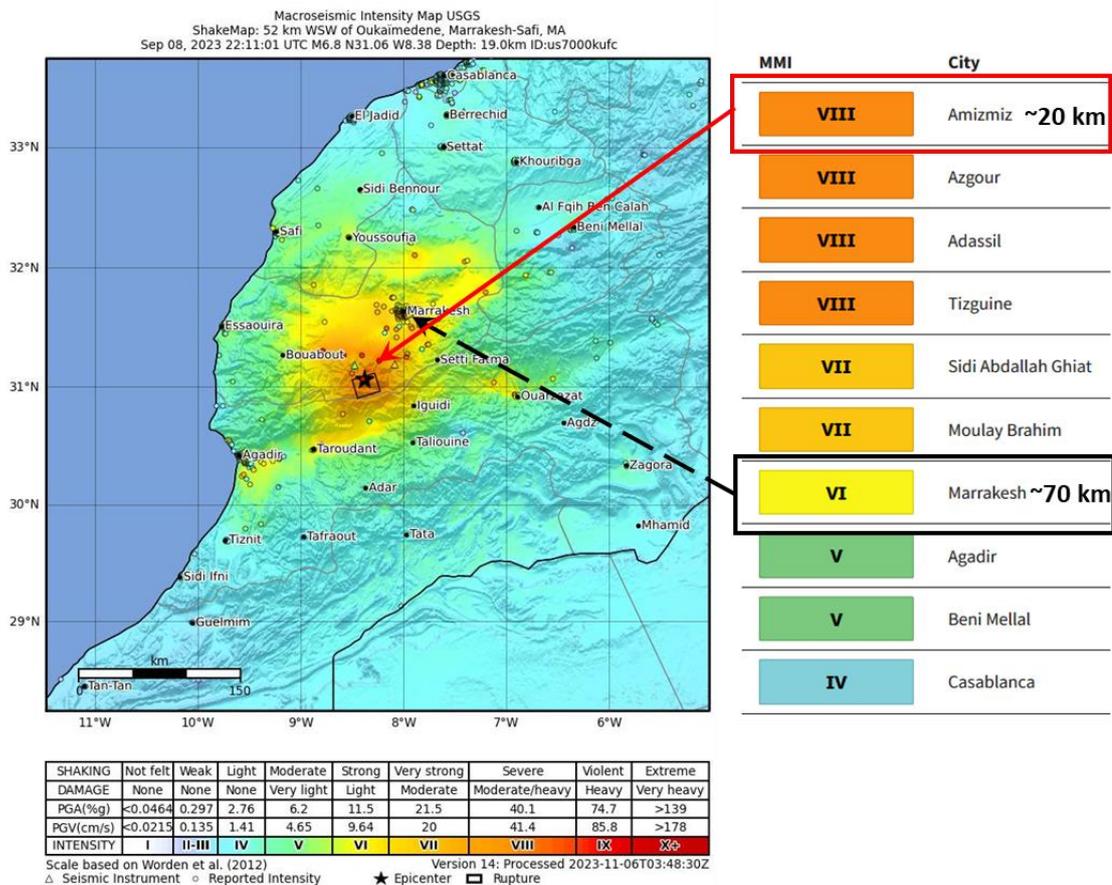


Figure 2-3 : Macroseismic intensity map of 2023 Al Haouz event (USGS, 2023).

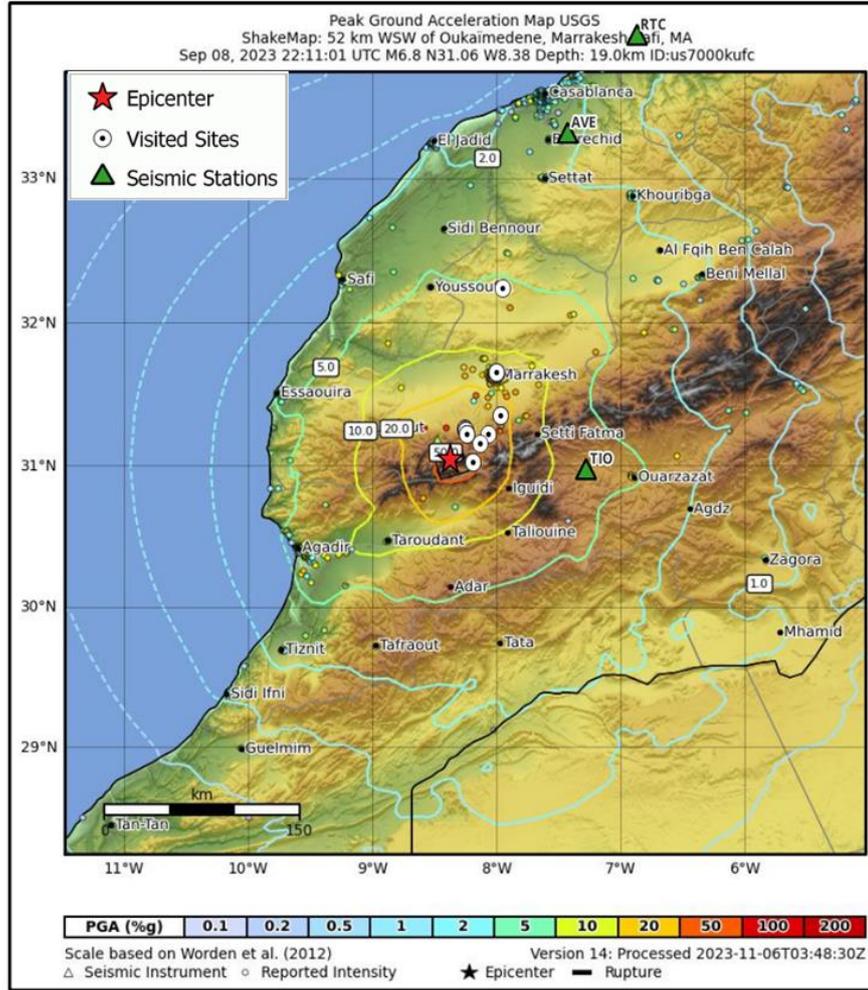


Figure 2-4 : USGS PGA map of 2023 Al Haouz event. Locations of visited sites by the SGEB team and seismic stations with publicly available data are marked.

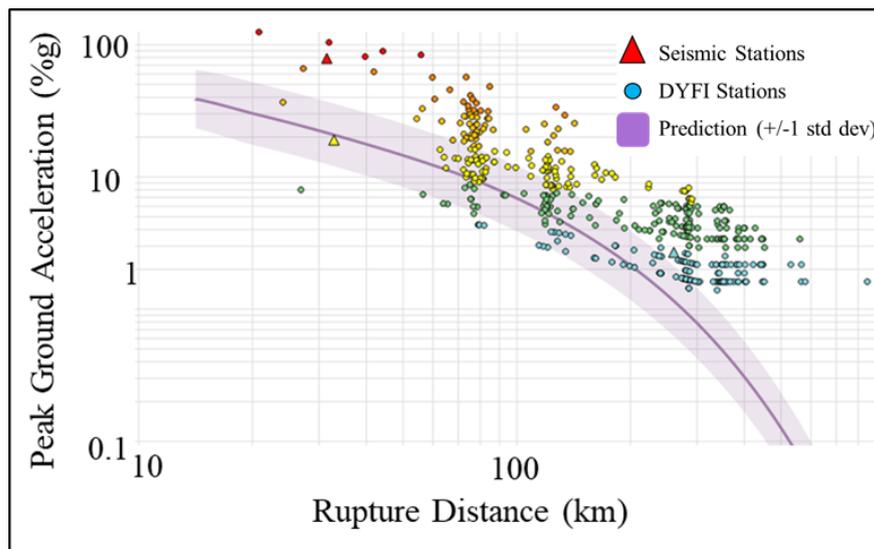


Figure 2-5 : Predicted and observed PGA from 2023 Al Haouz event, modified from USGS (2023). Abbreviations: DYFI: Did You Feel It.

Tableau 2-1 : List of seismic stations with available data.

Network Code	Station Code	Station Description	Epicentral Distance (km)	Reference
WM	TIO	ROA/UCM/GEOFON Station Tiouine, Morocco	109	WMSN (2023)
WM	AVE	ROA/UCM Station Averroes, Morocco	265	WMSN (2023)
MN	RTC	Rabat, Morocco	356	MVBSN (2023)
ES	EMUR	La Murta (Murcia) IGN, Spain	999	SDSN (2023)
CA	CGAR	Garraf, Spain	1464	CSN (2023)
CH	SALEV	Salève, Haute-Savoie, France	2083	SSN (2023)

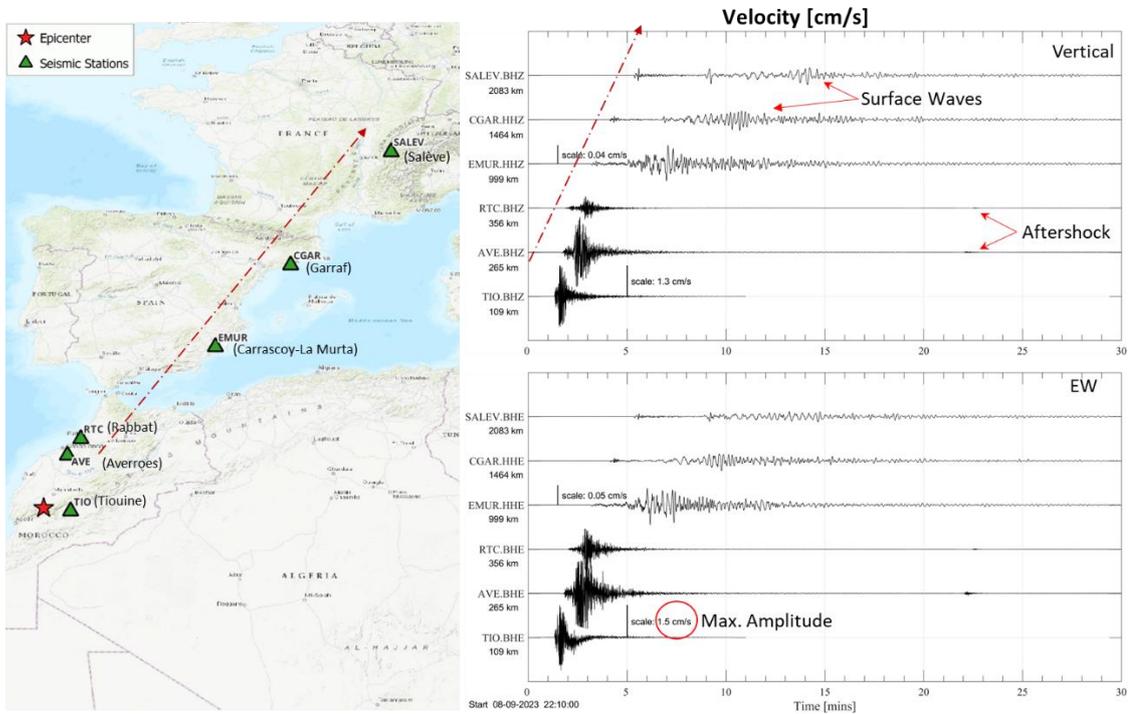


Figure 2-6 : Left: location of seismic stations with publicly available waveforms from 2023 Al Haouz event. The map has been created using QGIS on ESRI Topo basemap. Right: seismograms from vertical and EW components of the seismic sensors. Please note that the recordings from stations in and outside Morocco are plotted on two different amplitude scales for better visibility.

Since 2004, Morocco has implemented a national seismic standard, which underwent revision in 2011 (RPS 2000, 2011). The RPS 2000 establishes the minimum criteria for seismic design and construction standards within the country. It introduces two zoning maps, one for acceleration and the other for velocity, which delineate seismic hazard levels. These maps present acceleration coefficients associated with a 10% probability of exceedance over a 50-year period, based on PGA values corresponding to the Design Basis Earthquake (DBE) hazard level, as demonstrated in Figure 2-7. It defines seismic velocities ranging between 5 and 17 cm/s and accelerations between 0.04 and 0.18 g for five seismic zones. The epicentral area, along with the sites visited by the SGEb team and the stations with available recordings, is

located within the low to moderately seismic zones 2 and 4, with DBE PGA values ranging from 0.07 g to 0.14 g. To assess seismic response, we compare the pseudo-spectral acceleration (PSA) spectra at 5% damping derived from seismic stations in Morocco (Tableau 2-1) with the RPS spectra for various soil types in Zone 2, after considering the amplification factors. Notably, the nearest station, Tiouine, displays a spectral acceleration peak of 0.16 g at a period of 0.14 s, which remains below the code spectra.

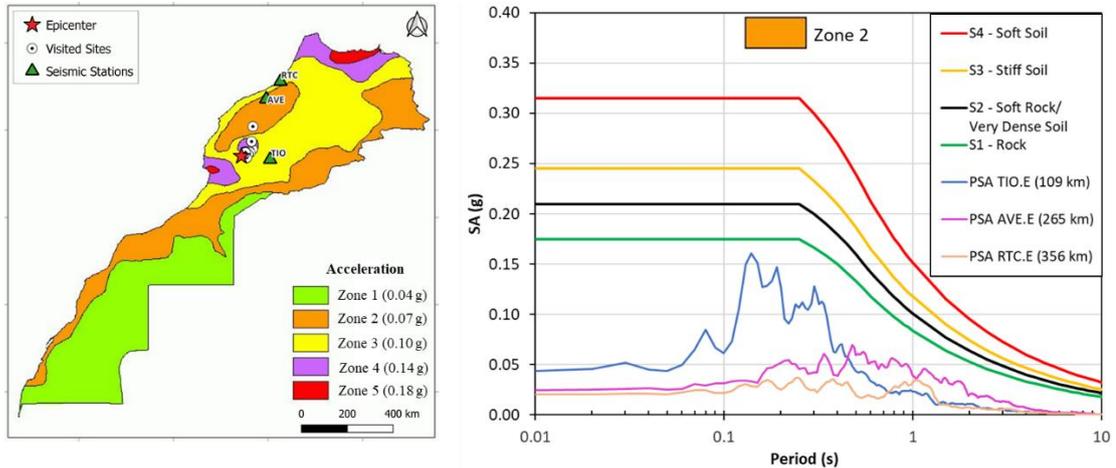


Figure 2-7 : *Left: national seismic standard of Morocco (RPS 2000, 2011) with acceleration for probabilities of 10% in 50 years. Right: comparison between the normalized response spectra of the RPS Zone 2 and PSA spectra estimated from EW component of seismic recordings of the stations located in Morocco (Tableau 2-1).*

2.4 Signs of potential site effects

The 2023 Al Haouz earthquake caused significant structural damage within a radius of approximately 60 km from the epicenter, particularly impacting numerous smaller communities situated in the foothills of the Atlas Mountains. Various factors have contributed to this widespread damage. Firstly, the magnitude of the earthquake, measuring 6.8, while not exceptionally large, was notably significant for Morocco, given that no earthquakes stronger than magnitude 6.0 had occurred within a 500 km radius of the epicenter in at least a century. Additionally, the nature of the plate boundary exacerbates the situation, as the collision has uplifted rocks, forming the Atlas Mountains, and creating a network of relatively understudied, complex faults across a vast area, presenting a low but still considerable risk. Evidently, a substantial amount of energy had accumulated between certain faults in the southern border of the High Atlas belt. Moreover, the earthquake occurred at a relatively shallow depth, heightening its potential impact. Subsequent aftershocks have further unsettled the affected region, particularly areas where structural damage has rendered buildings unstable. The most severely impacted villages lie near the earthquake's epicenter. These areas predominantly feature aging structures without seismic design considerations, making them highly susceptible to intense shaking. Furthermore, these buildings generally do not adhere to seismic building codes. Additionally, the shallow underground and geological characteristics of the localities, where natural features may exacerbate seismic activity through site amplification, could also play a significant role. Although a thorough analysis of seismological

and geophysical data is lacking, our observations prompt an exploration of the potential impact of site-related factors on amplifying earthquake ground motions.

Figure 2-8 illustrates that the areas we explored predominantly lie amidst the Paleozoic outcrops of the western High Atlas and the Haouz basin. The geological evolution of the region continues to be influenced by the tectonic forces that gave rise to the High Atlas. This mountain range encompasses a diverse array of rock types, comprising sedimentary, metamorphic, and igneous formations. At lower elevations, sedimentary rocks like limestone, shale, and sandstone, deposited across various geological epochs, dominate the landscape. As altitude increases, metamorphic rocks such as schist and gneiss become more abundant. Intrusions of igneous rocks, notably granite, further enrich the geological composition. The extensive folding evident in the High Atlas landscape is a consequence of the compressional forces arising from tectonic collisions. The presence of anticlines and synclines underscores this folding, creating a series of parallel mountain chains and valleys. Additionally, volcanic activity has left its mark on the region's geology, with remnants of ancient volcanic rocks and lava flows scattered throughout certain areas, reflecting the dynamic geological past of the High Atlas. Erosion, acting over millennia, has sculpted the terrain, shaping deep valleys and dramatic gorges within the mountain range.

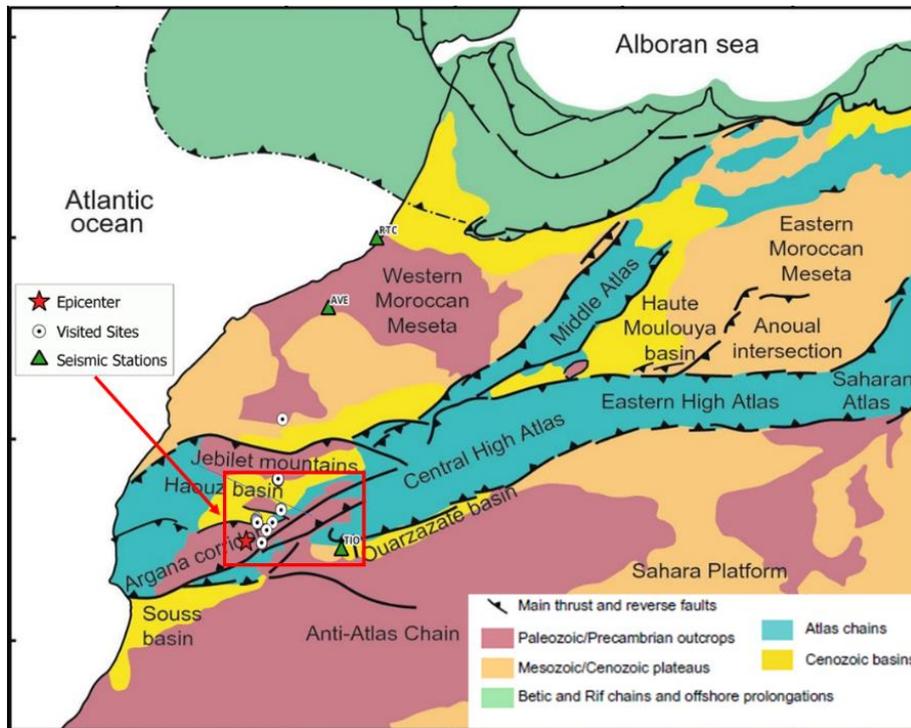


Figure 2-8 : Main geological units of northwestern Africa after Moussaid et al. (2023). Locations of the Al Haouz event and the visited sites are shown in the area marked by the red rectangle.

The formation of the Haouz basin results from tectonic sedimentation, with Tertiary and Quaternary formations resulting from the erosion of the High Atlas chain (Ferrandini & Le Marrec, 1982). The geological evolution of the Haouz basin is characterized by a sequence of events, commencing in the Mesozoic era with the establishment of a Paleozoic basement (Ambroggi & Thuille, 1952). Subsequent movements of faults and flexures, linked to tertiary tectonic activity, contributed to the formation of a significant depression between the High Atlas and Jebilet mountains. This depression served as a repository for recent sediments,

eroded from the High Atlas chain during its uplift in the Oligo-Miocene and Pliocene periods. These sediments primarily comprise alluvial deposits, generated through multiple cycles of erosion and sedimentation over extended periods. Continental or torrential processes, such as river transport, landslides, and fluvial deposition, played key roles in their formation. Characterized by a mixture of grain sizes including sand, gravel, and clay, these deposits are commonly found in environments influenced by continental processes like rivers, streams, and alluvial plains. Torrential-type deposits, on the other hand, arise from high-energy processes associated with intense rainfall or flash flooding, where rapid erosion and sediment transport lead to the deposition of coarse-grained sediments in downstream areas with reduced flow velocity. The distinctive features of the young, alluvial deposits of the Haouz basin render it susceptible to complex site effects.

Comprehending the geological aspects is paramount in evaluating seismic hazards and the likelihood of site amplification. The principal geological features that may contribute to site-related effects in the regions impacted by the Al Haouz event can be outlined as follows:

Rock types: The High Atlas region's complex geological structure, with folded and faulted rock formations of different types, can contribute to variations in ground motion. The seismic properties of these rocks, such as their density and stiffness, can also influence the transmission of seismic waves. The presence of faults and the geometry of rock layers can influence how seismic waves travel through the subsurface, potentially leading to localized amplification.

Mountainous topography: The rugged topography of the High Atlas, characterized by steep slopes and deep valleys, can influence how seismic waves interact with the landscape. The topographic relief can focus and amplify seismic energy, particularly in narrow valleys or along the flanks of mountains. Irregularities in the topography, such as changes in slope, variations in elevation, and the presence of ridges or peaks, can focus and concentrate seismic energy.

Sedimentary basins: The sedimentary deposits have varying seismic velocities compared to solid bedrock. Shallow subsurface layers, such as loose sediments and unconsolidated deposits, often have lower shear-wave velocities compared to deeper, more consolidated rock layers. The presence of softer, less dense materials near the surface can lead to trapping and amplification of seismic energy as the seismic waves pass through these materials. This amplification effect can result in stronger and more prolonged ground shaking.

Resonance effects: Resonance occurs when the natural frequency of the subsurface layers matches the frequency of the seismic waves, causing an increase in amplitude and duration of ground motion at specific frequencies. Resonance between the natural frequencies of the site and buildings can lead to severe damage.

Figure 2-9 displays satellite images of the regions we explored near the epicentral zone. These areas are situated at the foothills and fringes of the mountains, where the most significant damage occurred. It's well-known that topography affects ground motion, generally amplifying shaking at ridges and potentially impacting surrounding low-lying areas.

Figure 2-10 depicts the vicinity of our visit in Amizmiz, approximately 18 km from the epicenter. By comparing satellite images before and after the earthquake, we notice relatively more damage on the right side of the street, delineated by the red polygon. The accompanying photos from our visit (bottom panel of Figure 2-10) highlight the condition of buildings on both sides of the street. However, it is important to note that seemingly undamaged buildings on the left may be relatively new and could have sustained internal damage not readily apparent. Given that the buildings on the right are situated on a gentle slope, it is worth considering whether site characteristics have contributed to spatial variations of damage in this area.

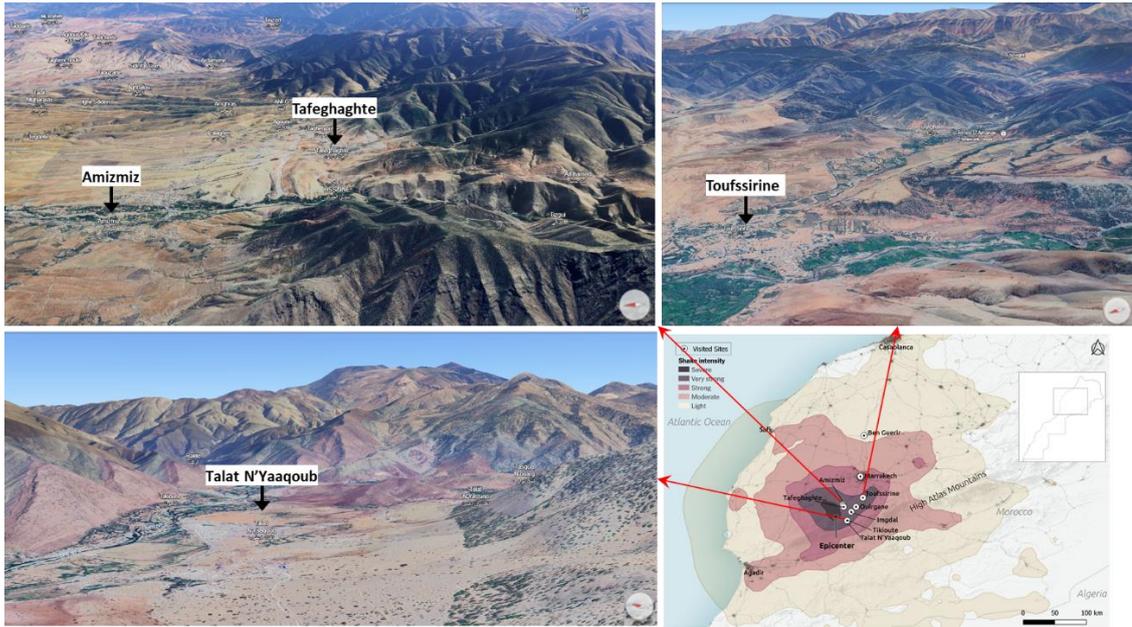


Figure 2-9 : Top and bottom-left: locations and surroundings of the visited epicentral areas from Google Earth images (GE3D, 2023 a,b,c). Bottom-right: locations of sites on the shake-map recreated from Leatherby et al. (2023).



Figure 2-10 : Top: Google Earth images of the Amizmiz area before and after the Al Haouz event (GE Amizmiz, 2022,2023). Bottom: views of two sides of the streets, direction indicated by the red arrows on the top right image. (credit A. Imtiaz, 25 November 2023, Amizmiz).

Figure 2-11 illustrates the before and after images of damage in Talat N’Yaaqoub, located 11 km from the epicenter. Numerous buildings in this area are constructed on slopes, as evidenced by a zoomed-in view, revealing ground failures and lengthy cracks near the structures. Damage observed in the Tafeghaghte area, situated 15 km from the epicenter at the base of the mountain slopes (Figure 2-12), raises questions regarding the potential influence of resonance or complex site effects on seismic ground motion. Additionally, the earthquake triggered severe rockfalls in various areas, with some examples depicted in Figure 2-13. Although debris from fallen blocks had been cleared shortly after the event, remnants near steep, exposed slopes suggest a high susceptibility to ground shaking induced by earthquakes like the Al Haouz event.



Figure 2-11 : Top: Google Earth images of the Talat N’Yaaqoub area before and after the Al Haouz event (GE Talat N’Yaaqoub, 2022, 2023). Middle: Zoomed in images of the area marked by the red rectangle. Bottom: observed damaged buildings on slopes. Right: observed ground failure. (credit A. Imtiaz, 24 November 2023, Talat N’Yaaqoub).



Figure 2-12 : Top: Google Earth images of the Tafeghaghte area before and after the Al Haouz event (GE Tafeghaghte 2022, 2023). Bottom: observed damage. (credit A. Imtiaz, 25 November 2023, Tafeghaghte).



Figure 2-13 : Observed rockfall debris. (credit E. Lattion, A. Imtiaz, 24 November 2023, on the way between Toufssirine and Talat N'Yaaqoub).

2.5 Conclusion

The September 8, 2023, Al Haouz earthquake, occurring in the western High Atlas Mountain range with a moment magnitude of 6.8 and a hypocentral depth of 26 km, ruptured an oblique-reverse fault, although the specific fault responsible remains unidentified. This intraplate event took place far away from the tectonic plate boundary, where seismic activity is relatively low. The USGS reported ground motion intensities reaching up to VIII near the epicentral area, and peak ground accelerations exceeding predictions, reaching up to 0.78 g at a seismic station 30 km away. The presence of a complex network of active faults explains the seismicity in the area. Although earthquakes in this region tend to be less frequent and of smaller magnitude than those along the plate boundary, several significant past seismic events underscore its susceptibility. Some researchers suggest a unique lithosphere thinning process combined with an anomalous mantle uplift at the Atlas Mountains has the potential to cause such a large magnitude event.

The earthquake was strongly felt in mountainous villages near the epicenter and caused significant damage to buildings. Subsequent aftershocks have further unsettled the affected region, particularly areas where structural damage has rendered buildings unstable. Observations of the SGEB team from the post-seismic reconnaissance mission underscore the complex interplay of geological, topographical, and site-specific factors influencing the seismic hazard and potentially amplifying ground motions. The earthquake had a significant impact due to its shallow depth and the presence of underlying geological complexities, including active faulting and diverse rock formations. Although no geophysical or seismological data were available from the visited areas, our visual observations and literature review led us to hypothesize that the rugged mountainous terrain of the High Atlas region, coupled with the presence of sedimentary basins and resonance effects, likely played a role in the variation of ground shaking across the affected areas. The resulting damage inflicted on communities, particularly those situated near mountain slopes and within sedimentary basins, highlights the importance of research and monitoring efforts for understanding local geological conditions.

Current seismological knowledge does not allow for the prediction of earthquakes. Nevertheless, seismic hazard studies play a crucial role in identifying regions where earthquakes are most likely to occur and evaluating the associated probability and uncertainty. These studies heavily rely on comprehending past seismicity and active tectonic structures. In Morocco, conducting reliable seismic hazard studies is essential for understanding the effects of ground shaking and reducing the impact of future earthquakes. Site-specific analyses examining subsurface conditions, seismic velocities, and local geological structures through geophysical and seismological data are particularly important. Understanding how seismic waves interact with various soil types and geological formations enables a more precise assessment of earthquake hazards, particularly in urban areas and populated regions. This knowledge guides the design and construction of buildings and infrastructure, playing a crucial role in bolstering communities' resilience against earthquakes.

3. Post-sismique

Gustavo Cortés & Meriton Beqiraj

3.1 Introduction

La gestion post-sismique est une opération complexe qui nécessite des ressources importantes et, idéalement, une phase de préparation. La Figure 3-1 présente un diagramme qui résume les phases généralement rencontrées après un événement sismique, ou d'autres catastrophes naturelles. Bien que dans les faits, chaque réponse à une catastrophe est différente et que les phases ne sont pas toujours précisément délimitées, les principes reflétés dans la figure sont caractéristiques.

La phase aigüe de la réponse comprend la recherche et le sauvetage et a lieu immédiatement après l'événement. Dans les premiers jours, les personnes se soutiennent spontanément, mais dans les jours et les semaines qui suivent, ce soutien devient plus organisé et inclut les pouvoirs publics et d'autres acteurs (aide organisée). La population touchée a généralement besoin d'une aide d'urgence, notamment de soins de santé, d'eau potable et de nourriture, d'abris et d'articles d'hygiène.

Des mesures de première urgence visant à sécuriser les bâtiments qui risquent de s'effondrer à la suite de répliques sont également mises en œuvre au cours des premières semaines, en particulier dans les localités denses où l'accès pourrait être affecté par un nouvel effondrement, ou dans le cas de bâtiments de grande valeur, par exemple, les bâtiments patrimoniaux.

Une phase d'évaluation de la sécurité des bâtiments non effondrés ayant subis des dégâts doit être menée pour informer les populations concernées si elles peuvent retrouver leur habitation en toute sécurité. Il est donc important que des experts puissent guider ce processus de décision afin de permettre aux personnes de regagner leur habitation en toute sécurité, mais aussi d'éviter qu'elles ne retournent dans une maison qui n'est pas sûre et qui pourrait entraîner des blessures ou des victimes, notamment à la suite d'une nouvelle réplique. Ceci est illustré dans la Figure 3-1 dans le cadre de l'évaluation post-sismique, comme « Conseils sur l'habilité des bâtiments ».

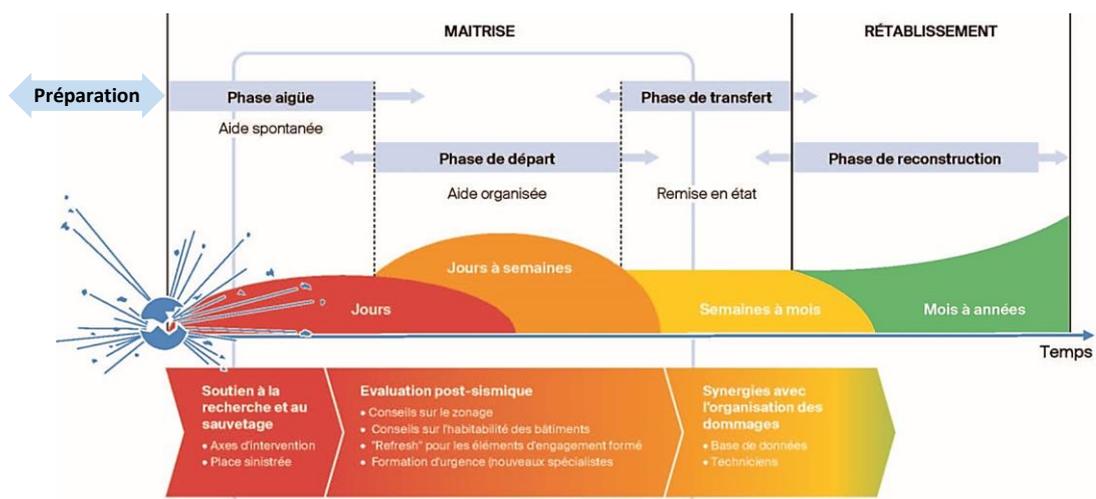


Figure 3-1 : Cycle de gestion des catastrophes - figure adaptée du Manuel pour l'évaluation des bâtiments après un séisme, Office fédéral de la protection de la population, Suisse, (OFPP, 2021).

La réponse se poursuit avec les phases de réhabilitation et de reconstruction dans les mois et les années qui suivent. Il convient également de noter qu'une première partie a été ajoutée à la Figure 3-1, afin d'inclure la phase de préparation. Cette phase comprend la planification de la réponse, mais aussi des éléments de réduction des risques de catastrophes.

3.2 Contexte post-sismique de la mission

Dans le cas du tremblement de terre d'Al Haouz, au Maroc, du 8 septembre 2023, la mission de reconnaissance s'est déroulée près de 3 mois après l'événement. Les opérations de recherche et de sauvetage avaient déjà eu lieu, les routes avaient été dégagées pour rétablir les accès et l'aide humanitaire était en cours. Dans cet effort collectif, l'université UM6P a rapidement mis en place le programme nommé « Rebuild » en lien avec différentes autorités publiques visant d'une part à apporter des moyens rapides pour la phase aigüe mais également à mettre à profit les connaissances et compétences de l'université pour les phases suivantes.

La région d'Al Haouz faisant partie de la chaîne de montagnes du Haut Atlas, les villages sont généralement accessibles via une unique route. L'accès aux villages dans les premiers instants après le séisme a été sérieusement compliqué par de multiples éboulements et chutes de pierres sur la route. La mise en œuvre de moyens matériels lourds a été nécessaire. Lors de la mission de reconnaissance, les accès aux villages avaient été rétablis. Un exemple d'une route empruntée lors de la mission se trouve en Figure 3-2, où des pierres ont été dégagées de la route.



Figure 3-2 : Route déblayée en direction de Talat N'Yaaqoub (crédit E. Lattion).

Dans la plupart des villages visités, des campements de différentes tailles étaient présents pour accueillir les populations sinistrées. Dans ce contexte, alors que la saison hivernale s'approchait et que les nuits étaient déjà froides à la fin novembre, il y avait un nombre important de personnes qui ne pouvaient pas retourner dans leur habitation (voir Figure 3-3). Par ailleurs, certaines familles choisissaient d'exploiter leur habitation endommagée durant la journée et de passer les nuits sous tente. Ceci démontre à l'échelle individuelle le niveau de risque accepté par la population sous contraintes dans ces situations de crise.

Bien que nous n'ayons pas reçu d'informations de la part des autorités concernant la procédure d'évaluation de l'habitabilité, il a été observé que des évaluations d'habitabilité des bâtiments avaient été menées. Selon les informations reçues sur place, celles-ci sont menées par des

bureaux d'étude mandatés par les pouvoirs publiques ou éventuellement par des bénévoles. Nous avons également constaté que certaines personnes n'étaient pas sûres de l'habitabilité de leur résidence, ce qui a constitué une source importante de détresse.

L'effort de l'UM6P dans le cadre de son programme « Rebuild » se portait, au moment de la mission de reconnaissance, sur la mise en place d'écoles temporaires à l'aide de structures modulaires. Ces constructions ont pu être observées dans le village d'Amizmiz. Enfin, de nombreuses mesures de première urgence ont également été observées principalement dans le centre-ville de Marrakech, ce thème est abordé plus en détail à la Section 3.4.



Figure 3-3 : Campement d'urgence établi dans la région de Al Haouz (crédit M. Beqiraj).

3.3 Evaluation des bâtiments après un séisme : « Conseils sur l'utilisabilité des bâtiments »

Comme déjà évoqué, il est essentiel que des experts évaluent les bâtiments afin de déterminer s'ils peuvent être exploités en toute sécurité dans leur état actuel (i.e. après le séisme et en tenant compte d'une éventuelle réplique à proximité), après quelques interventions, ou si les bâtiments ne peuvent pas être exploités et doivent être démolis. Dans le cadre de la mission, un échantillon de bâtiments a été évalué en utilisant le formulaire suisse "Formulaire d'évaluation de l'utilisation de bâtiments après un séisme" (OFPP, 2023). L'objectif principal était d'utiliser le formulaire comme guide dans nos observations des dommages dans les bâtiments évalués. L'utilisation du formulaire a également permis d'obtenir un retour d'information sur les aspects techniques et pratiques de la méthodologie d'évaluation. Par exemple, il a permis de comprendre le temps nécessaire à l'évaluation d'un bâtiment et la possibilité pour une équipe de deux personnes d'effectuer l'évaluation. D'autre part, la clarté du formulaire et la manière de résoudre les divergences d'opinion entre les membres de l'équipe ont été des sujets de réflexion.

L'évaluation des dommages causés aux bâtiments et aux infrastructures est une partie essentielle du processus de récupération et de reconstruction après un séisme. Si un bâtiment peut être utilisé en toute sécurité après un tremblement de terre (i.e. en tenant compte d'une éventuelle réplique à proximité), il doit être utilisé par la ou les familles qui y vivent, car cela permet de d'attribuer l'aide efficacement où elle est nécessaire (dans le cas des bâtiments non sécurisés). Cela permet également aux familles disposant d'un bâtiment sécurisé de reprendre

plus facilement leurs activités de subsistance. En revanche, un bâtiment non sécurisé ne doit pas être utilisé, car il pourrait mettre en danger la vie des personnes qui y vivent. Les évaluations doivent donc être effectuées par des ingénieurs qualifiés.

En Suisse, l'Organisation dommages sismiques (ODS) est chargée d'organiser l'évaluation des bâtiments après un séisme. L'objectif de l'évaluation est de déterminer si le bâtiment peut être utilisé en toute sécurité, d'estimer l'ampleur des dégâts dans le bâtiment et de déterminer si des mesures urgentes doivent être prises pour éviter un nouvel effondrement, qui pourrait mettre en danger les structures voisines ou bloquer l'accès. L'évaluation comprend une section d'identification du bâtiment, une section de classification de la typologie et de la vulnérabilité sismique du bâtiment, des sections d'identification du niveau de dommages subis par les éléments structurels et non-structurels et une section d'évaluation du risque d'effondrement.

Il convient de noter que pour déterminer si un bâtiment peut être utilisé en toute sécurité, il est nécessaire de prendre en compte non seulement les dommages observés, mais aussi la vulnérabilité sismique existante. Selon la philosophie suisse, la question complexe posée aux ingénieurs chargés de l'évaluation est la suivante : les habitants seront-ils en sécurité si une réplique de même intensité que l'événement principal se produit à proximité du bâtiment évalué ?

Plusieurs villes ont été visitées entre le 23 et le 27 novembre 2023 dans le cadre de cette mission de reconnaissance. A Amizmiz, le formulaire suisse a été testé sur deux bâtiments. Les résultats de l'un des deux bâtiments, illustré à la Figure 3-4, sont présentés ici.



Figure 3-4: Bâtiment de 2 étages évalué avec le formulaire Suisse d'évaluation des bâtiments (crédit G. Cortés).

La construction initiale de ce bâtiment a débuté en 1975, selon le propriétaire, et au fil des années, plusieurs extensions ont été ajoutées. Ce schéma d'agrandissement progressif est fréquemment observé dans les bâtiments visités, témoignant de la tendance des propriétaires à continuer d'agrandir leur maison au fur et à mesure qu'ils disposent de revenus. Positionné sur un terrain d'angle, le bâtiment s'élève sur deux étages, avec une pièce supplémentaire et une terrasse au troisième niveau. À noter qu'aucun sous-sol n'est présent. La surface est d'environ 12m x 12m et la hauteur de chaque niveau est d'environ 3m. Cette maison était habitée par une famille de 6 personnes.

La construction était constituée de cadres en béton avec des remplissages en maçonnerie. Étant donné que les murs étaient recouverts de plâtre, il était difficile de déterminer s'il s'agissait d'une maçonnerie confinée ou d'un remplissage de maçonnerie. Le type de maçonnerie utilisée variait, allant de la pierre au niveau du sol à la brique aux niveaux supérieurs. Les dalles de plancher sont en béton (ou hourdi), ce qui crée des diaphragmes relativement rigides. Aucune irrégularité horizontale n'a été observée, mais une irrégularité verticale, causée par le décalage de la façade au-dessus du rez-de-chaussée, était présente (voir Figure 3-5). En général, outre la qualité des matériaux utilisés, le bâtiment disposait d'un bon système de résistance aux forces latérales. La qualité des matériaux utilisés, en particulier dans les parties inférieures du bâtiment où la maçonnerie de pierre a été utilisée, est suspectée d'être de qualité insuffisante (voir Figure 3-5 gauche). En outre, le joint entre ce bâtiment et le bâtiment adjacent n'avait pas la qualité requise (Figure 3-5 droite).



Figure 3-5 : Dégâts à la base du mur (à gauche), et photo montrant le joint entre le bâtiment étudié (à gauche) et le bâtiment adjacent (crédit G. Cortés).

Le bâtiment présentait d'importantes fissures dans les murs. La Figure 3-7 montre le niveau des dégâts observés au rez-de-chaussée, tandis que la Figure 3-8 montre les dégâts au 1er étage. Il est clair que les dégâts les plus importants ont été observés au niveau du rez-de-chaussée. Ce niveau de dégâts correspond à un niveau de dégâts de degré 3 selon l'échelle macrosismique européenne EMS-98 (Grünthal et al., 1998). Les dégâts de degré 3 décrivent les bâtiments qui ont subi des dégâts substantiels à importants, avec des fissures larges et étendues observées dans la plupart des murs.

Compte tenu des méthodes de construction employées, ce bâtiment ne comportait pas d'éléments non structurels distincts, mais toutes les cloisons faisaient également partie du système structurel. Le bâtiment adjacent présentait des dommages importants, dont un effondrement partiel du niveau supérieur, mais ceux-ci ne semblaient pas constituer une menace significative pour le bâtiment examiné. En ce qui concerne les fondations, aucun dommage visible n'a été observé. Le terrain est en pente très légère.

Le fait que le bâtiment a subi des dommages importants sans effondrement (par rapport niveau élevé des dommages, voir Figure 3-6) confirme qu'il avait une typologie de structure favorable, avec un nombre adéquat de murs dans chaque direction, malgré la qualité

insuffisante des matériaux utilisés. La capacité résiduelle du bâtiment a été considérablement réduite et, par conséquent, si une autre réplique importante se produit, ce bâtiment serait susceptible de subir des dommages de degré 4 ou plus (EMS 98).



Figure 3-6 : Photos montrant l'ampleur des dégâts dans la ville d'Amizmiz ; en haut : le cas d'un mécanisme de « soft story » du premier étage ; en bas : le cumul des décombres à proximité de bâtiments endommagés (crédit M. Beqiraj).

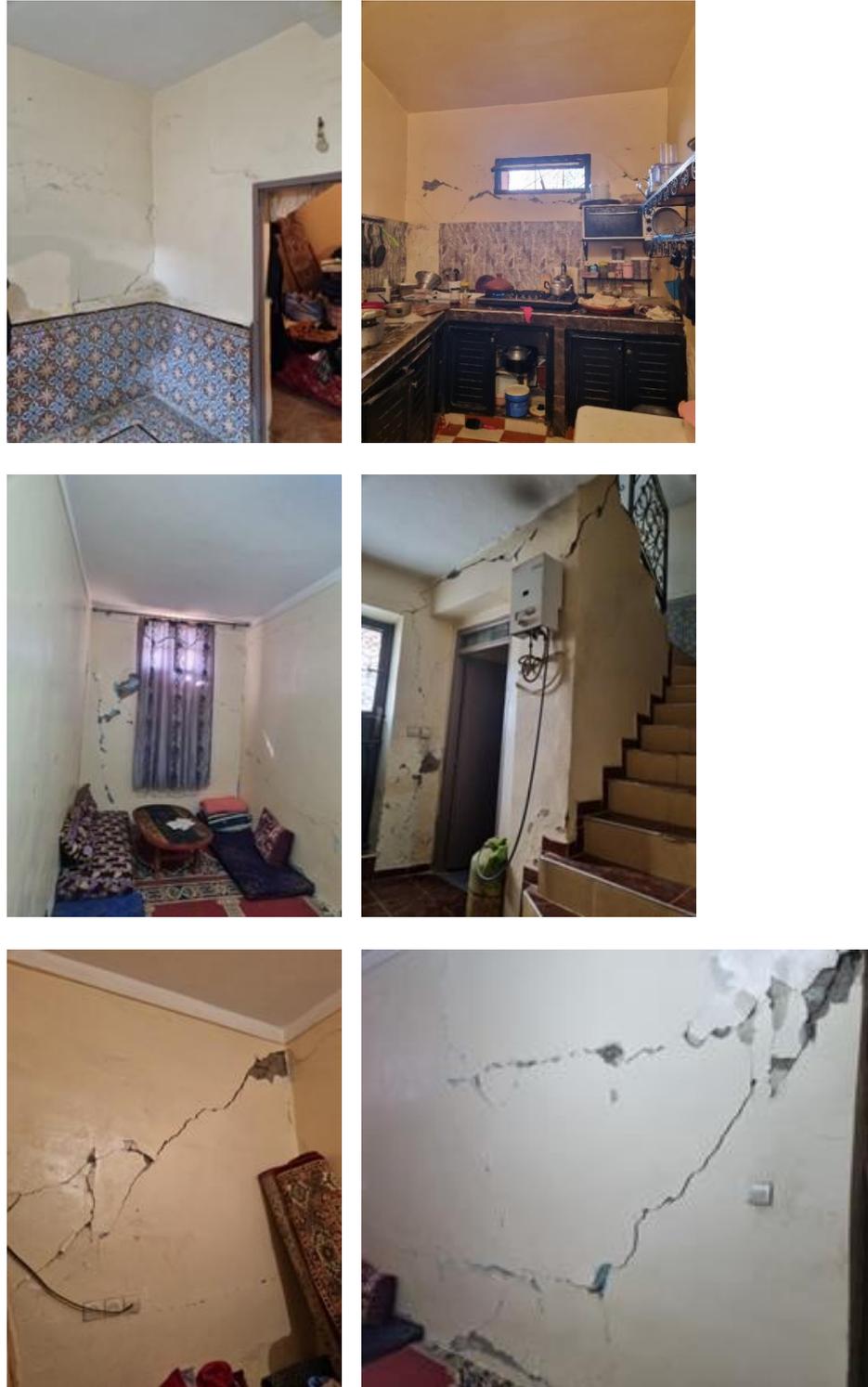


Figure 3-7 : Photos montrant l'ampleur des dégâts au rez-de-chaussée (crédit G. Cortés).



Figure 3-8 : Photos montrant l'étendue des dégâts au premier étage (crédit G. Cortés).

3.4 Mesures de première urgence

Un grand nombre de mesures de première urgence permettant de sécuriser temporairement des bâtiments endommagés ont été observées, principalement dans la ville de Marrakech. Dans les autres zones sinistrées observées lors de la mission, les mesures de première urgence étaient peu nombreuses voire inexistantes. La visite de Marrakech s'est essentiellement portée sur la vieille ville où se trouvent les bâtiments historiques, nommée la « Medina ». Bien que la ville se trouve relativement éloignée de l'épicentre, les secousses ont tout de même été ressenties et des bâtiments ont été endommagés.

Selon les informations obtenues sur place, un important évènement « L'Africa Investment Forum 2023 » a eu lieu à Marrakech peu de temps après le séisme, les 8-9 novembre. Pour cette raison entre autres, les autorités ont rapidement entrepris des travaux de sécurisation de première urgence et de déblaiement des décombres. Toutefois, lors de la mission, il était encore possible de relever de multiples mesures de première urgence encore en place. Celles-ci sont documentées dans les Figure 3-10 à Figure 3-15, selon leur typologie.

De manière générale, les mesures de première urgence observées concernent principalement des murs présentant un risque d'effondrement hors-plan. Ceci a été observé en particulier pour sécuriser les façades des bâtiments sacrés (Figure 3-10 et Figure 3-12). Ces éléments étaient également présents pour sécuriser les accès exigus dans la vieille ville, en particulier pour les bâtiments d'angles où les dégâts se concentrent (Figure 3-13, Figure 3-14 et Figure 3-15). D'autre part, des ceinturages et des chainages ont été observés sur les parties saillantes des bâtiments sacrés (Figure 3-11 et Figure 3-12). De manière générale, ces mesures se matérialisent par diverses structures provisoires en bois et avec des étais en acier. Les mesures observées peuvent être mises en perspectives avec les mesures regroupées dans le formulaire d'évaluation des bâtiments après un séisme (Figure 3-9).

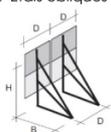
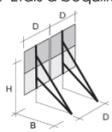
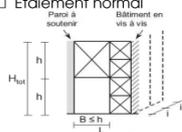
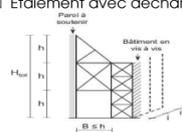
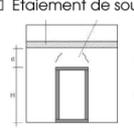
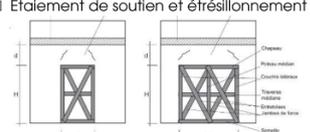
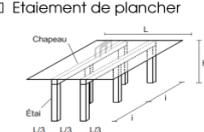
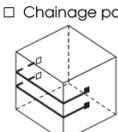
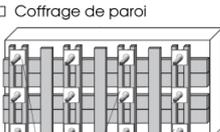
<input type="checkbox"/> Etaisement de soutien	<input type="checkbox"/> Etais obliques sur base d'appui  <input type="checkbox"/> Etais à béquille  <p>H : hauteur d'appui des jambes de force D : Entraxe entre les étais B : Largeur de la base d'étai</p>
<input type="checkbox"/> Etaisement en vis à vis	<input type="checkbox"/> Etaisement normal  <input type="checkbox"/> Etaisement avec décharge 
<input type="checkbox"/> Etaisement de soutien et étréssillonement d'ouvertures	<input type="checkbox"/> Etaisement de soutien  <input type="checkbox"/> Etaisement de soutien et étréssillonement 
<input type="checkbox"/> Etaisement de planchers et balcons	<input type="checkbox"/> Etaisement de plancher  <input type="checkbox"/> Etaisement de balcon 
<input type="checkbox"/> Cintrage en bois arcs et voûtes	<input type="checkbox"/> Cintrage avec passage fermé  <input type="checkbox"/> Cintrage avec passage ouvert 
<input type="checkbox"/> Chainage avec câbles en acier	<input type="checkbox"/> Chainage total  <input type="checkbox"/> Chainage partiel coulant  <input type="checkbox"/> Chainage partiel ancré 
<input type="checkbox"/> Cercrages de confinement piliers et colonnes	<input type="checkbox"/> Colonne circulaire  Degré de dommage <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="checkbox"/> pilier carré / rectangulaire  Degré de dommage <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
<input type="checkbox"/> Coffrage de parois en maçonnerie	<input type="checkbox"/> Coffrage de paroi  <div style="background-color: black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> Schéma et dimensions principales indiquées en section 11 de la fiche : <input type="radio"/> <input type="radio"/>

Figure 3-9 : Extrait de l'annexe au formulaire d'évaluation des bâtiments après un séisme, tiré du manuel STOP, Sergio Basti et al. 2009.



Figure 3-10 : *Étaiements obliques en bois sur base d'appui ; Mosquée de la Kasbah, Marrakech (crédit G. Cortés).*



Figure 3-11 : *Chainage total (ceinturage) en acier de la partie saillante supérieure ; Mosquée de la Kasbah, Marrakech (crédit Y. Zhu).*



Figure 3-12 : *Gauche : étaitements obliques en acier sur base d'appui et chainage total en acier des parties saillantes ; droite : chainage total en acier de la partie supérieure de la tour ; Mosquée Koutoubia, Marrakech (crédit E. Lattion).*



Figure 3-13 : Gauche : étais à béquille en bois et acier ; droite : étaielement en vis-à-vis avec des étais en aciers ; Vieille ville Medina, Marrakech (crédit G. Cortés).



Figure 3-14 : Gauche : cintrage en arc en bois (crédit G. Cortés) ; droite : étaielement en vis-à-vis en bois d'un bâtiment d'angle (crédit E. Lattion) ; vieille ville Medina, Marrakech.



Figure 3-15 : *Etaiements en vis à vis en acier d'un bâtiment d'angle ; vieille ville Medina, Marrakech (crédit E. Lattion).*

3.5 Conclusion

La gestion post-séisme est une opération complexe dont certains aspects ont pu être observés au cours de la mission. La visite des sites touchés par le séisme a permis de constater directement l'ampleur des dégâts causés aux structures, mais aussi d'observer et d'apprendre de la réponse post-séisme en cours.

Le formulaire suisse d'évaluation des bâtiments endommagés, qui a pour objectif de fournir des "Conseils sur l'habilité des bâtiments", a été appliqué. Par ailleurs, le déblaiement des décombres qui était toujours en cours dans les sites les plus proches de l'épicentre a été observé. De même, des éléments de la réponse post-sismique à court terme ont été relevés; des abris temporaires ont été mis à la disposition de la population locale déplacée, des écoles ont été mise en place à l'aide de structures modulaires et des mesures d'urgence ont été mises en œuvre pour stabiliser et sécuriser des bâtiments endommagés.

4. Bâtiments en béton armé et maçonnerie

Eric Lattion

4.1 Bâtiments récents en zone périurbaine

Dans les régions proches de Marrakech, les bâtiments en cours de construction qui ont pu être observés correspondent aux standards des bâtiments traités par les normes marocaines en vigueur, c'est-à-dire soit de type « portiques », avec des cadres en béton armé qui servent de contreventement et un remplissage en maçonnerie de brique non porteuse (Figure 4-1), soit de type « voiles » avec des murs de contreventement en béton armé couplés ou non à des cadres (Figure 4-1). Ces bâtiments récents relativement loin de l'épicentre (80 km) n'ont pas été inspectés et ne font donc pas l'objet de ce rapport.



Figure 4-1 : Gauche : bâtiments en béton armé en cours de construction de type cadre ; droite : bâtiments en béton armé en cours de construction de type cadre avec voiles en béton armé ; (crédit E. Lattion, proche de Marrakech).

4.2 Bâtiments en zone rurale

4.2.1 Caractéristiques

Les principaux dégâts observés se situent dans les zones montagneuses plus proches de l'épicentre. Dans ces régions, les bâtiments d'habitation typiques en béton armé sont de type portique et comportent généralement 1 à 3 niveaux. Une grande partie de ces bâtiments ont été construits avant l'entrée en vigueur du RPS 2000 (2011). Comme en témoigne la présence de fers en attente dans les piliers de toiture des bâtiments habités et selon nos discussions avec les habitants, ces bâtiments sont souvent construits durant plusieurs années, voire plusieurs générations. Il est donc probable que les règles de construction parasismique valables pour un bâtiment neuf ne soient pas appliquées dans le cadre d'une surélévation d'un bâtiment existant.

La plupart des bâtiments rencontrés dans ces régions sont construits de manière empirique : il s'agit de structures porteuses simples et régulières, avec des trames usuelles et modérées, construites selon des règles de construction empiriques issues du savoir-faire vernaculaire (Figure 4-2). En l'absence de calcul et de contrôle par un ingénieur, la qualité structurelle de ces constructions dépend du savoir-faire des constructeurs, qui découle directement de leur niveau de formation et de leur expérience. En fonction de la situation économique et de la disponibilité de la main-d'œuvre qualifiée dans le secteur du bâtiment, la qualité des constructions peut donc être très variable.



Figure 4-2 : Bâtiment d'habitation en béton typique des zones rurales, avec piliers et sommiers en béton armé, remplissages en maçonnerie et agrandi sur plusieurs années, voire générations. A Toufssirine. (crédit E. Lattion).

Comme le montre la Figure 4-4, les dalles sont généralement constituées de poutrelles préfabriquées en béton armé avec des hourdis en béton et un surbéton non armé de 4 à 8 cm. Les poutrelles et le surbéton ne sont pas liés par des connections métalliques, mais uniquement par la friction due à la rugosité élevée des poutrelles (Figure 4-5 et Figure 4-6). Les armatures d'attentes des poutrelles qui sont ensuite bétonnées dans les sommiers de bord sont constituées de fers droits de 10 cm de long, sans crochet, avec des aciers ronds de diamètre 5 à 6 mm. La capacité de ce type de dalle à former un diaphragme et à assurer une liaison suffisante avec les murs en cas de séisme est limitée.

Une fabrique artisanale de briques en béton (comme on en trouve à de nombreux endroits au Maroc) a été visitée près d'Amizmiz (Figure 4-3). Le mélange de sable, ciment et gravier est pressé manuellement puis les briques durcissent pendant plusieurs jours à l'air libre. Elles sont régulièrement humidifiées pour éviter une dessiccation trop rapide. Selon les explications données et nos mesures, il s'agit de briques légères, avec de grandes alvéoles. La charge volumique est d'environ 8 kN/m^3 et le taux de ciment utilisé est d'environ 150 kg/m^3 . La quantité de ciment n'est pas mesurée avec précision et peut être inférieure. Il s'agit donc de briques en béton « maigre », de faible résistance, conçue pour une utilisation non structurale (murs de remplissage, parois non porteuses).



Figure 4-3 : Fabrique artisanale de briques en béton près d'Amizmiz (crédit E. Lattion).



Figure 4-4 : Dalle à hourdis près d'Amizmiz (crédit E. Lattion).



Figure 4-5 : Dépôt de poutrelles en béton armé pour dalles à hourdi, près d'Amizmiz (crédit Y. Zhu).



Figure 4-6 : Dalle à hourdis après l'effondrement d'un bâtiment à Amizmiz (crédit E. Lattion).

Dans de nombreux cas observés, les piliers ont été bétonnés après la construction des remplissages en maçonnerie, ce qui permettait d'économiser les coffrages latéraux. Le sommier de liaison est dans ce cas aussi généralement bétonné contre les briques. La dalle à hourdis avec son bandeau de bord en béton armé est posée sans liaison sur le sommier en béton. Il s'agit donc plutôt d'une maçonnerie confinée et les murs en briques sont dans ce cas soumis à un effort normal, bien que leur résistance soit faible. Comme la norme marocaine ne traite pas la maçonnerie confinée comme système de contreventement parasismique, il s'agit de constructions empiriques de qualité très variable.

Ce type de construction peut être qualifié d'hybride, car il s'agit en réalité de construction en maçonnerie partiellement porteuse et confinée, renforcée par des piliers en béton et dont la structure est reliée par des chaînages en béton faiblement armé. Même si cela a l'apparence d'un système à portique, les détails de cadre, le taux d'armature et les dimensions des sections en béton ne permettent pas de considérer que ces éléments en béton armé sans remplissage peuvent assurer le rôle de contreventement. La stabilisation horizontale est dans ce cas apportée par les murs en briques et améliorée par le confinement partiel des murs dans les piliers et sommiers en béton armé. Il ne s'agit pas strictement d'une maçonnerie confinée, car il n'y a pas suffisamment de piliers en béton de part et d'autre des ouvertures. De plus l'imbrication entre les piliers et la maçonnerie n'est pas suffisante. Il semble même que certaines briques aient été sciées et ne forment ainsi pas des créneaux de liaison avec le béton.



Figure 4-7 : Construction en béton et maçonnerie à Toufssirine (crédit Y. Zhu).



Figure 4-8 : Détail de construction en béton et maçonnerie à Toufssirine, avec sommiers bétonnés après le montage des murs en maçonnerie (crédit M. Beqiraj).



Figure 4-9 : Bâtiment en béton et maçonnerie en construction à Toufssirine (crédit E. Lattion).



Figure 4-10 : Pilier en béton bétonné après le montage des murs en maçonnerie. Les dégâts dans les briques sont surtout visibles dans les zones confinées proches des piliers. Toufssirine (crédit E. Lattion).

La distinction entre les types de structures en portique ou hybride n'est pas toujours évidente. Dans les villes comme à Amizmiz, les bâtiments sont tendanciellement plus hauts et on trouve davantage de système à portique. Mais comme le montre la Figure 4-12 ce n'est pas toujours le cas, car les sommiers et piliers peuvent être disposés de manière irrégulière même pour un bâtiment de 3 à 4 étages.



Figure 4-11 : Bâtiment hybride béton-maçonnerie à Amizmiz (crédit E. Lattion).



Figure 4-12 : Bâtiment hybride béton-maçonnerie à Amizmiz. Sommiers et colonnes disposés de manière irrégulière. (crédit E. Lattion).

4.2.2 Dégâts observés dans les structures hybrides béton – maçonnerie

A Toufssirine, à environ 42 km de l'épicentre, les principaux dégâts observés concernent des ruptures locales ou hors plan dans les bâtiments en terre ou en maçonnerie de pierres comportant un ou deux niveaux. Globalement il y a eu peu d'effondrements complets de bâtiments. Dans ce village, les bâtiments hybrides béton-maçonnerie, même de trois niveaux, ont subi comparativement peu de dégâts. Il s'agit principalement de dégâts dans la maçonnerie (éclatements des briques de mauvaise qualité dus aux contraintes de compression, en particulier à proximité des zones confinées par le béton).



Figure 4-13 : Bâtiment hybride béton-maçonnerie à Toufssirine, vue extérieure (crédit H. Sehaqui).



Figure 4-14 : Bâtiment hybride béton-maçonnerie à Toufssirine, vue intérieure (crédit H. Sehaqui).

A Talat N'Yaaqoub, l'une des communes les plus affectées à 11 km de l'épicentre, deux bâtiments typiques de cette catégorie, avec des dommages importants mais non effondrés, ont pu être observés. Ces villas semblent relativement récentes et ont été construites sur un coteau, avec un remblayage en terre sur un niveau à l'arrière. Elles sont présentées dans les chapitres suivants.

Maison « grise » à Talat N'Yaaqoub

La maison dite « grise » (Figure 4-15), en cours de construction au moment du tremblement de terre, comporte un niveau dans lequel se sont concentrés les dégâts. Les murs de remplissage, composés de briques en béton à faible résistance et comportant des ouvertures, ont rompu à l'effort tranchant. La bielle comprimée du mur a également concentré les efforts au pied de la colonne d'angle, (Figure 4-16, Figure 4-19), ce qui a provoqué la rupture à l'effort tranchant du pilier en béton armé. Un pilier en béton situé au centre de la façade a aussi rompu à l'effort tranchant.

Le béton des sommiers et piliers qui ont été bétonnés après le montage des murs semble de mauvaise qualité et insuffisamment vibré. Une irrégularité dans la disposition des piliers est aussi visible (Figure 4-16). La quantité d'étriers dans les piliers est faible et il manque une armature horizontale dans l'angle de cadre assurant la transmission des efforts au sommier (Figure 4-19, Figure 4-18 et Figure 4-17). Ce mode de rupture s'est produit dans chacun des quatre pieds de piliers en béton armé. La présence des recouvrements de barres avec des longueurs d'ancrage insuffisantes a aussi augmenté les dommages. En raison de l'absence de piliers en béton de part et d'autre des fenêtres, de la qualité médiocre du béton et du faible taux d'armature, les effets en général favorables du confinement sont peu observés.

Le niveau des soubassements, composé de piliers en béton armé et de murs en pierres, ne semble pas avoir subi de dégâts. Les murs en pierres sollicités par un effort normal favorable et sans ouverture ont été suffisamment résistants.



Figure 4-15 : Maison hybride béton-maçonnerie à Talat N'Yaaqoub, vue latérale. (crédit E. Lattion).



Figure 4-16 : Villa grise à Talat N'Yaaqoub, rupture des piliers et écrasement de la rangée inférieure des briques en raison du déplacement du bâtiment (crédit M. Beqiraj).



Figure 4-17 : Villa grise à Talat N'Yaaqoub, vue intérieure avec dalle à hourdis et mur de façade. (crédit E. Lattion).



Figure 4-18 : Villa grise à Talat N'Yaaqoub, détail de la rupture de colonne (crédit E. Lattion).



Figure 4-19 : Villa grise à Talat N'Yaaqoub, détail de la rupture de la colonne d'angle qui a été poussée hors de son appui par manque d'armature (crédit E. Lattion).

Les efforts horizontaux et les déformations ont été accentués par la poussée du remblai situé à l'amont. Les fissures de plusieurs centimètres visibles dans le sol à 2 m du bâtiment montrent une décompression du sol et confirment le déplacement du bâtiment vers l'aval. Comme pour un ouvrage de soutènement, la poussée des terres supplémentaire due à l'accélération sismique accroît les sollicitations horizontales sur la structure porteuse. Les contreventements du bâtiment situés perpendiculairement au remblai subissent donc des efforts horizontaux plus élevés.



Figure 4-20 : Maisons rose et grise à Talat N'Yaaqoub, fissures dans le terrain (crédit E. Lattion).

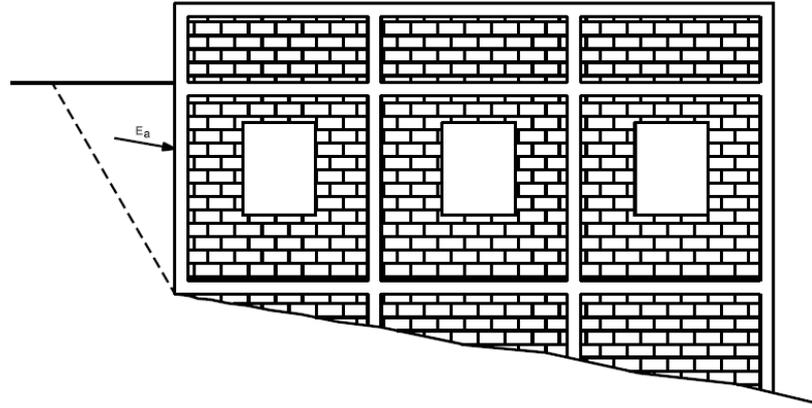


Figure 4-21 : Elévation schématique de la maison avec remblai amont et poussée des terres.

Maison « rose » à Talat N'Yaaqoub

La maison dite « rose » de Talat N'Yaaqoub est située à côté de la maison « grise ». Également adossée au terrain sur un niveau, elle comporte un niveau supplémentaire et présente une meilleure qualité constructive que la maison grise. En effet, les piliers et sommiers ont été montés avant les murs en briques et la qualité du béton semble meilleure que celle de la maison grise. Le taux d'armature (barres longitudinales et étriers) est également plus élevé. La structure a cependant aussi été lourdement endommagée. Les murs de remplissage non confinés se sont effondrés, principalement hors de leur plan, en raison de l'absence de liaison et d'effort normal. La structure est ici plus proche du système en cadre, mais n'a probablement pas été dimensionnée comme telle. L'absence de piliers et de sommiers autour des ouvertures a également été défavorable pour les remplissages en maçonnerie (Figure 4-27).



Figure 4-22 : Villa rose à Talat N'Yaaqoub (crédit M. Beqiraj).

Les dégâts principaux dans la structure en béton se sont produits en pied des poteaux. Le béton a rompu à l'effort tranchant et l'enrobage a éclaté (Figure 4-24). Des crochets montrent que les barres verticales situées au milieu sont stabilisées contre le flambage. Dans ce cas les étriers n'ont pas cédé et les barres verticales n'ont pas flambé. La rupture du béton malgré le taux d'armature relativement faible des étriers (diamètre 5 mm, espacement 15 à 20 cm) montre

que sa qualité et sa résistance sont très insuffisantes. Au pied d'une autre colonne on remarque que les barres verticales ont flambé (Figure 4-25).

Une rupture importante s'est aussi produite en tête de pilier (Figure 4-28) en raison du manque d'étrier et d'armature horizontale de liaison avec le sommet. Comme pour la maison grise, les Figure 4-24 et Figure 4-26 montrent que la poussée du remblai contre le bâtiment a augmenté les efforts horizontaux et a provoqué des dommages concentrés au niveau inférieur. Le mur contre terre, en pierres, s'est effondré hors de son plan en raison des efforts horizontaux dus à la poussée des terres.



Figure 4-23 : Villa rose à Talat N'Yaaqoub. Vue latérale (crédit Y. Zhu).



Figure 4-24 : Maison rose à Talat N'Yaaqoub, rupture du béton en pied de colonne (crédit Y. Zhu).



Figure 4-25 : Maison rose à Talat N'Yaaqoub, dégâts en pied de colonne avec flambage de barres verticales (crédit E. Lattion).



Figure 4-26 : Maison rose à Talat N'Yaaqoub, effondrement du mur en pierres situé contre le remblai (crédit E. Lattion).



Figure 4-27 : Maison rose à Talat N'Yaaqoub, manque de piliers et de sommiers autour des ouvertures (crédit H. Sehaqui).



Figure 4-28 : Maison rose à Talat N'Yaaqoub, rupture de la tête du pilier (crédit E. Lattion).



Figure 4-29 : Maison rose à Talat N'Yaaqoub, vue intérieure avec mur en pierres contre terre et mur de remplissage en briques (crédit E. Lattion).

4.2.3 Dégâts particuliers

La Figure 4-30 montre deux bâtiments semblables et récents en maçonnerie et béton à Amizmiz (22 km de l'épicentre). Les structures porteuses semblent avoir bien résisté mais l'intérieur des bâtiments n'a pas pu être inspecté. Les dégâts visibles concernent surtout des éclats dans les briques et des fissures dans les murs, ce qui est typique de ce type de structure. Les piliers et les sommiers ont été bétonnés après la construction des murs, mais il s'agit probablement de bâtiments dimensionnés en système cadre au vu de leur hauteur. Le confinement même partiel des murs en briques dans les éléments en béton semble avoir été favorable.

Le bâtiment de gauche montre plus de dégâts en raison de la grande ouverture au rez-de-chaussée et de la présence des percements pour les conduites qui ont affaiblis les murs. Le bâtiment de droite comporte davantage de sommiers de liaison, ce qui est favorable pour confiner les murs en maçonnerie.



Figure 4-30 : Bâtiments en maçonnerie confinée à Amizmiz (crédit E. Lattion).

Les Figure 4-31 et Figure 4-32 montrent un cas typique de rupture hors plan d'un parapet de façade de bâtiment. De nombreux bâtiments comportent une terrasse en toiture, fermée par un parapet en brique. Ces murs ont souvent basculé lors du séisme, en provoquant des dommages dans les rues au pied des bâtiments.



Figure 4-31 : Rupture hors plan d'un parapet de façade à Amizmiz, vue intérieure (crédit E. Lattion).



Figure 4-32 : Rupture hors plan d'un parapet de façade à Amizmiz, vue de la façade (crédit E. Lattion).

Sur la Figure 4-33, il s'agit d'un groupe de bâtiments d'habitation visités à Amizmiz. En apparence ils n'ont subi que peu de dégâts, mais les deux bâtiments de gauche sont de type hybride béton – maçonnerie de briques et présentent des dommages importants. Les piliers en béton armé ont subi des ruptures fragiles dues à l'interaction avec la maçonnerie. Le bâtiment situé tout à droite en maçonnerie de pierres comporte quant à lui moins d'ouvertures et les dégâts dans les murs en pierres sont moins importants.



Figure 4-33 : Bâtiments contigus à Amizmiz. (crédit E. Lattion).

Concernant les bâtiments contigus, la Figure 4-34 montre un saut de rigidité entre deux bâtiments, ce qui a provoqué une rupture de la colonne en béton armé du bâtiment le plus élevé.

Un cas particulier de rupture a été observé à Amizmiz, dans un bâtiment en béton armé et maçonnerie dont une colonne a flambé et cisailé au 2^e étage, ce qui a conduit au soulèvement d'une partie du mur de façade (Figure 4-35). Nous n'avons pas pu approcher de plus près ce bâtiment pour étudier ce phénomène plus en détail.



Figure 4-34 : Saut de rigidité entre deux bâtiments contigus à Amizmiz (crédit E. Lattion).



Figure 4-35 : Rupture d'une colonne par flambage à Amizmiz (crédit E. Lattion).

4.3 Autres ouvrages en béton

La zone touchée par le tremblement de terre comporte plusieurs barrages en béton qui n'ont pas été inspectés par notre équipe. Selon les informations reçues, il semble que ces structures ont été suffisamment résistantes.

Les ponts n'ont pas non plus été inspectés en détail mais il n'a pas été relevé d'effondrement ou de dommage rendant leur utilisation impossible. Il s'agit généralement de ponts de relativement petites portées, en béton armé. Pour franchir certains cours d'eau, des buses sont aussi utilisées à la place des ponts. Les Figure 4-36 et Figure 4-37 montrent des ponts-cadres en béton armé qui semblent en bon état.



Figure 4-36 : Pont en béton armé de type cadre à Imi N'ougarzi (crédit E. Lattion).



Figure 4-37 : Pont en béton armé près de Targa (crédit E. Lattion).

4.4 Conclusion

Dans les zones rurales, les bâtiments d'habitation en béton observés sont surtout de type hybride béton-maçonnerie issu de l'évolution empirique des modes de construction vernaculaires en pierres et renforts en béton armé. Il s'agit plutôt de maçonnerie confinée que de cadres, sans toutefois respecter toutes les règles habituelles de la maçonnerie confinée. Les dégâts observés sont typiques de ce type de construction et ont également été observés après les séismes dans d'autres pays. De manière générale, nous avons remarqué que la faible qualité des matériaux utilisés (béton et briques) a localement augmenté les dommages.

Nos observations se sont volontairement focalisées sur les bâtiments non effondrés afin de pouvoir essayer de déterminer les modes de rupture. Nous avons aussi observé des bâtiments en maçonnerie et béton armé totalement effondrés comme à Talat N'Yaaqoub à environ 11 km de l'épicentre (Figure 4-38 et Figure 4-39), mais les trop lourds dommages ne permettent pas d'analyser les mécanismes ayant conduit à la rupture et ces bâtiments ne font pas l'objet du présent rapport.



Figure 4-38 : Bâtiment effondré à Talat N'Yaaqoub (crédit Y. Zhu).



Figure 4-39 : Soft-storey, bâtiment à Talat N'Yaaqoub (crédit Y. Zhu).

5. Stone masonry buildings

Savvas Saloustros & Yuhan Zhu

5.1 Structural characteristics

5.1.1 Vernacular stone masonry buildings

Stone masonry buildings were common in all the areas surveyed during this mission. Typical vernacular stone masonry buildings have one to two stories and are characterized by small spaces and openings (Figure 5-1).

Stone masonry walls are constructed using multiple leaves with irregular stones of various sizes and shapes, with joints between stones filled with earthen mortar. Inspection of collapsed stone masonry walls indicates a limited number or the complete absence of through-stones connecting the external walls leaves, and the infill is comprised of small pebbles and earthen mortar (see Figure 5-2). The construction of stone masonry structures in Morocco is guided since 2011 by RPCTerre 2011.



Figure 5-1 : Example of vernacular stone masonry structures in Tafeghaghte (left) and Amizmiz (right) (credit S. Saloustros).

Overall, vernacular stone masonry buildings in the surveyed areas lacked structural characteristics that could improve the seismic response, such as robust wall-to-wall and floor-to-wall connections. Additionally, traditional floors are typically heavy and flexible, lacking diaphragmatic action. Figure 5-2 to Figure 5-4 illustrate the traditional floor system, comprised of layers of timber and soil materials organized from bottom to top as follows:

Rounded timber joists: serving as the primary structural elements transferring floor loads to the walls. Typically, these are connected to the walls via simple friction supports through holes, which may penetrate the entire wall thickness. According to RPCTerre 2011, the timber joints are spaced at 1 m and have a diameter of minimum 0.1 m. These dimensions varied in the surveyed buildings.

Secondary timber joists: positioned perpendicular to the main joists and placed atop them. These are smaller in diameter, and in several cases, completely absent.

Wooden mesh: positioned atop the timber joists to enclose the open space and provide the support for overlay materials.

Layer of soil material: with a thickness between 15 and 30 cm according to RPCTerre 2011. In some cases, this layer consisted of smaller layers of varying soil compositions (refer to Figure 5-3).

Top finishing: dependent on the case and constructed from diverse materials, such as stone tiles, earth plaster, or cement mortar.

In certain cases, a plastic sheet was visible either beneath or atop the thick layer of soil layer.



Figure 5-2 : Stone masonry typology and traditional floor in Tafeghaghte (15 km from epicentre) (credit S. Saloustros).

Figure 5-3 : Traditional floor with layers of varying soil compositions in Talat N'Yaaqoub (11 km from epicentre) (credit S. Saloustros).



Figure 5-4 : Stone masonry typology and traditional floor with a plastic sheet beneath the soil layer in Tafeghaghte (15 km from epicentre) (credit S. Saloustros).

5.1.2 Structural variations of stone masonry structures

Variations from the presented vernacular structural system included one or more from the following structural alterations: substitution of the traditional floor with a modern beam-block floor (presented in Section 4.2.1), the use of reinforced concrete horizontal elements (tie-beams, ring beams), and the use of reinforced concrete vertical elements (tie-columns). In most cases, it is uncertain whether these variations are the result of structural transformations of the original structural system, or they were part of the original structure. Lastly, vertical extensions with the addition of more floors made from modern materials were also common

in the visited areas. Examples of these variations to the vernacular structural system are presented along with typical damage typologies in the following section.

5.2 Seismic damage

5.2.1 Vernacular stone masonry structures

Vernacular stone masonry structures exhibited characteristic damage patterns and failure typologies attributable to their inherent structural vulnerabilities. These included cracking between perpendicular walls resulting from inadequate wall-to-wall connections, wall leaf separation, and out-of-plane collapse due to low quality masonry and lack of through-stones connecting the wall leaves. The heavy and flexible diaphragms, coupled with their deficient wall connections, led to a lack of box-behaviour contributing to partial wall collapses.

The use of stone units sourced from riverbeds was common in the surveyed areas. The rounded shape of these units hampers effective interlocking, while their smooth surface reduces frictional strength. These characteristics, coupled with the low cohesion of earthen mortar in joints, diminish the shear capacity of the walls. Consequently, this resulted in many cases in wall disintegration under the seismic loading, leading to global or partial collapse, as illustrated in Figure 5-5 and Figure 5-6.



Figure 5-5: Collapsed stone masonry building with smooth and rounded stone units in Amizmiz (18 km from epicentre) (credit Y. Zhu).



Figure 5-6: Local collapse at floor-to-wall connection in Amizmiz (18 km from epicentre) of a stone masonry wall with smooth and rounded stone units (credit S. Saloustros).

Tafeghaghte, located 15 km from the epicentre near the High Atlas Mountains, suffered the most severe impact among the surveyed locations, with nearly complete collapse of its building stock (see Figure 5-7). Most structures in the village were single-story buildings constructed from either stone or earthen materials, with a few exceptions built from confined block masonry. The scale of devastation witnessed in Tafeghaghte, in contrast to the damage observed in the nearby city of Amizmiz, suggests the potential influence of site effects.



Figure 5-7 : *Collapsed and heavily damaged stone masonry structures at the village of Tafeghaghte (15 km from epicentre) (credit S. Saloustros).*

Figure 5-8 presents two stone masonry buildings with regular distribution of openings at Amizmiz. The stone masonry is constructed with irregular stones with rough surface, as can be seen between the buildings due to the localized loss of plaster. The two buildings exhibit horizontal flexural cracking at the top and bottom of the piers of the top floor, characteristic of a strong spandrel-weak pier structural typology. These buildings were among the few still in use during our visit to the old center of Amizmiz.



Figure 5-8 : *Strong-spandrel weak-pier structural typologies exhibiting flexural cracking at the top and bottom of piers in two adjacent stone masonry structures in Amizmiz (18 km from epicenter) (credit S. Saloustros).*

5.2.2 Presence of reinforced concrete elements

In the villages of Tafeghaghte and Talat N'Yaaqoub, numerous buildings showcased a mixed structural system comprising stone masonry walls along with reinforced concrete piers and ring beams. These structures also featured a modern floor system. It was not possible to identify whether these reinforced concrete elements constituted structural transformations or were part of the original construction.

As illustrated in Figure 5-9 and Figure 5-10, these structures exhibited significant damage, characterized by the partial or complete out-of-plane collapse of the stone masonry walls situated between the reinforced concrete elements. This suggests that the interaction between the stone masonry walls, and reinforced concrete elements did not conform to the behaviour expected of confined masonry structures. The collapse of the walls in these two cases indicates that the floors are supported primarily by reinforced concrete piers, resulting in a lack of stabilizing vertical force exerted on the walls. The out-of-plane partial or global

collapse of the walls was facilitated by the poor quality of stone masonry, which lacked through-stones between the wall leaves (see also Figure 5-11).



Figure 5-9 : Collapsed stone masonry walls in a building in Talat N'Yaaqoub with reinforced concrete piers and ring-beam (11 km from epicentre) (credit Y. Zhu).



Figure 5-10 : Collapsed stone masonry walls in a building with reinforced concrete piers and tie-beams in Tafeghaghte (15 km from epicentre) (credit S. Saloustros).



Figure 5-11 : Wall leaf separation and out-of-plane collapse of the external leaf in Tafeghaghte (15 km from epicentre) (credit Y. Zhu).

In several cases, the use of rectangular stone units and adherence to regular structural characteristics prevented collapse or extensive damage. The building in Figure 5-12, located in Tikioute, stands out amidst the collapse of most stone masonry buildings in the area. The structure exhibits structural and construction characteristics absent in the neighbouring buildings: i) the masonry units display greater regularity with rough surfaces and rectangular shapes, ii) the earthen mortar joints are thinner, and iii) a reinforced concrete tie-beam encircles the building at the level of the window openings. A second layer of concrete can be observed at the top of the structure, likely corresponding to the floor. Despite the presence of significant damage, including cracking between perpendicular walls and localized failures around openings, the structure remains standing. As mentioned, this resilience assumes greater significance considering the extensive damage suffered by the entire village of Tikioute, where most stone masonry buildings collapsed.



Figure 5-12 : (Left) Corner and (right) front view of one of the few standing stone masonry buildings at Tikioute (11 km from epicentre) (credit S. Saloustros).



Figure 5-13 : (Top) Front and (bottom) corner view of a stone masonry building with minimal damage in Tafeghaghte (15 km from the epicentre) (credit S. Saloustros).

Figure 5-13 shows one of the few buildings of Tafeghaghte that remained visibly intact, exhibiting minimal visible damage of the stone masonry walls from the exterior. In this case, stone masonry is characterized by approximately rectangular units with thin mortar joints and horizontally aligned joints. Although access to the interior of the building was not feasible, the floor system appears modern. At one corner, there is a vertical extension made from modern block masonry.

5.2.3 Presence of modern floors

One of the most common deviations from the traditional structural system of masonry buildings was the substitution of the traditional floor system with a beam-block arrangement (see Section 4.2.1). The presence of a modern floor system did not prevent the collapse of structures with poor-quality masonry. Figure 5-14 illustrates the case of the mosque in Tikioute, where the combination of a poor-quality masonry using rounded stones with a modern floor system resulted in the complete collapse of the structure. Similarly, the building of Figure 5-15, also located in Tikioute, featured a part of the façade constructed in stone masonry, while the remainder, including the perpendicular walls, was built from modern block masonry. The stone masonry façade experienced complete collapse, resulting in the localized collapse of the floor. In this case, it appears that the connection between modern and stone masonry, as well as between stone walls and the new floor, was insufficient to provide box-behaviour.

Figure 5-16 shows the partial collapse of the façade walls in a stone masonry building with a new beam-block floor in Tafeghaghte. The top part of the wall in contact with the ring beam has completely disintegrated, indicating that poor-quality masonry cannot ensure a sufficient connection with the ring beam. The ring beam itself was of poor quality, as evidenced by the presence of several large stones between the reinforcement. The detachment of the ring beam from the floor system suggests that the two elements were cast separately, failing to establish a connection of the diaphragm with the walls. A significant portion of the floor remains intact, likely due to the presence of modern block masonry walls in the interior of the building.



Figure 5-14 : *(Left) Front and (right) back view of the collapsed mosque at Tikioute (11 km from epicentre). The presence of a new floor did not prevent the collapse of the poor-quality stone masonry walls (credit Y. Zhu).*



Figure 5-15 : Collapse of stone masonry wall facades in buildings with new beam-block floors at Tikioute (credit Y. Zhu).



Figure 5-16 : Partial collapse of a stone masonry building with a new beam-block floor in Tafeghaghte (15 km from epicenter). (Left) The ring beam at the top was completely disconnected from the supporting walls along its whole length, failing to provide the desired box-behaviour (credit E. Lattion). (Right) Closer view of the ring-beam with evidence the presence of large stone units within the reinforcement (credit S. Saloustris).

The building in Figure 5-17 had a reinforced concrete floor resting on top of the stone masonry walls. It exhibits local collapse of the floor, at a location with a geometrical recession of the façade, and separation and out-of-plane collapse of the external wall leaf. The latter could be the result of an eccentric application of the normal loads from the roof on the stone masonry walls. This, coupled with the absence of through-stones connecting the two leaves, increased the vulnerability of the external wall leaf.



Figure 5-17 : *Out-of-plane collapse of one leaf in a stone masonry building with RC slab in Amizmiz (credit S. Saloustros).*

5.2.4 Vertical extensions

In Amizmiz (18 km from the epicentre), several of the stone masonry structures have undergone vertical extensions by adding one or more stories. In most cases, the walls of the new stories were constructed using modern construction typologies, such as confined block masonry. Figure 5-18 and Figure 5-19 illustrate two examples of such structures. In these cases, the increased vertical load due to the floor addition led to diagonal shear cracking at the ground floor walls, although the structures did not collapse. Figure 5-18 presents significant structural alterations resulting from the vertical extensions, such as the introduction of reinforced concrete corbels within the stone masonry walls to support the new floor. The presence of these corbels caused stress concentration, resulting in local cracking of the stone masonry.

The building in Figure 5-20 in Amizmiz has a vertical floor extension made of modern block masonry. The misalignment of the corners of the top floor with those of the ground floor indicates the possibility of the modern floor sliding atop the stone masonry. The stone masonry at the ground floor exhibits an out-of-plane collapse of the external wall leaf, possibly due to a combination of poor masonry quality and an eccentric application of normal loads on the walls, leaving the external leaf unloaded.



Figure 5-18 : A three-storey building in Amizmiz (18 km from the epicentre) featuring rubble stone masonry at the ground floor. (Left) View of the building from the corner. (Right) View of the ground floor façade (credit S. Saloustros).



Figure 5-19 : A three-storey building in Amizmiz (18 km from the epicentre) with regular stone masonry on the ground floor (credit Y. Zhu).



Figure 5-20 : Out-of-plane collapse of the external wall leaf at the ground floor of a building with vertical extension in Amizmiz (18 km from the epicentre) (credit S Saloustros).

5.3 Conclusion

Stone masonry buildings were among the most severely impacted by the earthquake in the surveyed areas. The primary cause of damage and collapse was attributed to the use of poor-quality masonry, characterized by rounded irregular stones (often with smooth surfaces), thick mortar joints using earthen mortar, and a lack of connection between the wall leaves. This masonry typology exhibited compromised wall integrity during seismic loading, resulting in local or, in several instances, global collapse of the structure. The traditional floor system failed to exhibit box-like behaviour due to its in-plane flexibility and inadequate connection with the surrounding walls.

Conversely, resilient stone masonry structures displayed a combination of good construction and structural characteristics. In terms of construction, these structures were built using regular stone units and thin mortar joints. Regarding structural features, they demonstrated structural regularity and, in some cases, incorporated horizontal and vertical tying elements.

Structural modifications to the traditional construction system involved the incorporation of vertical and horizontal reinforced concrete elements and modern floor systems. However, in most cases these alterations did not prevent the collapse of buildings constructed from poor-quality irregular stone masonry.

6. Earthen buildings

Savvas Saloustros & Yuhan Zhu

6.1 Structural characteristics of vernacular earthen buildings

Rammed earth and adobe masonry are two construction techniques used for building load-bearing walls made from soil in the surveyed areas (Figure 6-1 to Figure 6-3). Adobe structures were mainly observed in Toufssirine and Marrakech, i.e. in a distance above 40 km from the epicentre. Rammed earth structures were more prevalent in the rest of the surveyed areas. The construction of earthen structures in Morocco is guided since 2011 by RPCTerre 2011.

Rammed earth walls are built directly on-site by compacting the soil mixture in progressive layers within a rigid formwork. Adobe bricks, on the other hand, consist of a mixture of soil and water shaped into prismatic forms using a formwork. These bricks are used to build masonry walls after drying under the combined effects of air and sunlight. Mortar joints in adobe masonry typically consist of soil material in all surveyed areas, except for Toufssirine, where mortar joints incorporate flat rectangular stones embedded within the earthen mortar (see Figure 6-4).



Figure 6-1 : Typical two-storey earthen building in Toufssirine (42 km from epicentre) (credit E. Lattion).



Figure 6-2 : Typical single-storey rammed earthen building in Talat N'Yaaqoub (11 km from epicentre) (credit E. Lattion).



Figure 6-3 : Typical two-storey building with a stone masonry at the ground floor and rammed earth walls at the first floor in Amizmiz (18 km from epicentre) (credit S. Saloustros).



Figure 6-4 : *Combination of rammed earth with adobe brick masonry in two buildings in Toufssirine (42 km from epicentre). Mortar joints in the adobe masonry of the right building incorporate flat stones within the earthen mortar (credit E. Lattion, left; S. Saloustros, right).*



Figure 6-5 : *Examples of the wall-to-floor connections in two rammed earth buildings in Toufssirine (42 km from epicentre) (credit E. Lattion, left; S. Saloustros, right).*



Figure 6-6 : Close-up in a traditional floor system in a partially collapsed building in Amizmiz (18 km from epicentre) connected to the rammed earth walls through a stone masonry layer (credit S. Saloustros).

Typical vernacular earthen buildings consist of one to two stories and are characterized by small spaces and openings (see Figure 6-1 to Figure 6-3). The lower part of the ground floor is typically made of stone masonry to protect the earthen materials from rising damp. In Amizmiz, several buildings were constructed with stone masonry on the ground floor and rammed earth walls on the first floor (e.g. Figure 6-3). Earthen buildings were characterized by large material heterogeneity, with a combination of construction materials and techniques, such as rammed earth with adobe (Figure 6-4), or rammed earth with stone masonry. Window and door lintels were typically made from timber, although a unique case with a shallow arched lintel was seen in Toufssirine (Figure 6-5).

Floors in earthen buildings are made using the traditional floor system consisting of timber and soil, as detailed in Section 5.1.1. The connection between the timber floor joists and the walls relies on friction (Figure 6-5), and timber joists can extend through the walls. In several instances, a layer of stone masonry was used at the level of the floor (see Figure 6-6). It is not clear whether this was the result of a later intervention or substitution of the floor. Unlike stone masonry structures, vernacular earthen structures in the surveyed areas did not present significant structural alterations with the introduction of modern construction materials.

6.2 Seismic damage

6.2.1 Vernacular earthen structures

The separation of orthogonal walls through vertical cracking was one of the most observed damage patterns in the surveyed earthen buildings. Figure 6-7 and Figure 6-8 illustrate cases of vertical cracking between orthogonal walls in adobe buildings, and Figure 6-9 to Figure 6-11 in rammed earth buildings. This damage typology indicates that the tensile strength of the earthen units was insufficient to transfer the horizontal load from the wall loaded out of its plane to its orthogonal one.



Figure 6-7 : Vertical cracking between orthogonal walls in an adobe building in Toufssirine (42 km from epicenter) (credit S. Saloustros).

Figure 6-8 : Vertical cracking at the interface between adobe and rammed earth in Toufssirine (42 km from epicenter) (credit S. Saloustros).



Figure 6-9 : Cracking between orthogonal walls in two parts of a rammed earth building in Toufssirine (42 km from epicenter) (credit S. Saloustros, left; M. Devaux, right).



Figure 6-10 : Building with the ground floor in rammed earth in Imgdal (15 km from epicenter). Vertical cracking at the corner and horizontal cracking between the construction joints of rammed earth blocks (credit Y. Zhu).



Figure 6-11 : Separation between orthogonal walls along construction joints in a rammed earth building in Talat N'Yaaqoub (11 km from epicenter). Presence of timber element within two neighboring rammed earth blocks (credit S. Saloustrós).

Generally, we did not observe any measures to enhance interlocking between orthogonal walls in earthen structures, apart from a unique case in Talat N'Yaaqoub where a timber element was observed embedded across two orthogonal rammed earth blocks (Figure 6-11). Timber elements were not systematically used to improve wall-to-wall or wall-to-floor connections in the surveyed vernacular earthen structures.

Construction joints between different materials or between rammed earth blocks were observed to be a weak point in most of the surveyed vernacular earthen buildings. Figure 6-11 presents a commonly observed case of poor interlocking due to the presence of construction joints at the connection between orthogonal walls. When interlocking at corners and the tensile strength of rammed earth and adobe units was sufficient to avoid vertical cracking at the intersection of orthogonal walls, cracking localized at construction joints further away from the corner. Figure 6-3 and Figure 6-12a illustrate cases of corner failures in rammed earth buildings, where cracks extended through construction joints between rammed earth blocks. In Figure 6-12b, similar damage is observed at the top corner of the building, with cracks going through the construction joint between rammed earth blocks and adobe bricks in the façade wall. Figure 6-13 illustrates a case with the separation of rammed earth blocks from neighboring ones at the top of the wall and their out-of-plane movement.



(a)

(b)

Figure 6-12 : (a) Corner failure in a building with ground floor from stone masonry and top floor in rammed earth in Amizmiz (18 km from epicenter); (b) Corner failure in a building from rammed earth and adobe masonry in Tufssirine (42 km from epicenter) (credit S. Saloustros).



Figure 6-13 : Separation of rammed earth blocks at their construction joints and out-of-plane deformation at the top of the wall in Talat N'Yaaqoub (11 km from epicenter) (credit Y. Zhu).

Wall overturning was a common failure pattern observed in earthen structures in the visited areas, as depicted in Figure 6-14 to Figure 6-17. This pattern frequently occurred in facade

walls parallel to the direction of the floor joists, suggesting that the absence of vertical stabilizing force from the vertical floor loads, coupled with the lack of interlocking between orthogonal walls, heightened their vulnerability to out-of-plane movement.



Figure 6-14: Out-of-plane overturning of rammed earth and adobe walls and floor collapse in neighboring buildings in Toufssirine (42 km from epicenter) (credit E. Lattion).



Figure 6-15: Out-of-plane failure of rammed earth walls and floor collapse in aggregate buildings in Talat N'Yaaqoub (11 km from epicenter) (credit S. Saloustros).



Figure 6-16: Out-of-plane collapse of a rammed earth façade in Amizmiz (18 km from epicenter). The stone masonry ground floor exhibits an out-of-plane collapse of the external wall leaf (credit S. Saloustros).



Figure 6-17: Collapse of a rammed earth building in Amizmiz (18 km from epicenter). Poor interlocking with neighboring building and with orthogonal walls (credit S. Saloustros).



Figure 6-18 : Shear cracking in short walls between opening of the building of Figure 6-17 in Imgdal (15 km from epicenter) (credit Y. Zhu).



Figure 6-19 : Shear cracking in wide pier of a rammed earth building in Talat N'Yaaqoub (11 km from epicenter) (credit Y. Zhu).

In-plane diagonal shear cracking was observed only in a few cases. Figure 6-18 illustrates diagonal shear cracking in short columns between window openings in a building in Imgdal. Figure 6-19 (see also Figure 6-2) shows a single-floor rammed earth building in Talat N'Yaaqoub, which exhibits diagonal shear cracking in a wide pier. Lastly, diagonal shear cracking is also present in the rammed earth walls at the ground floor of the building in Toufssirine, shown in Figure 6-12b.

6.2.2 Vertical extensions in earthen structures

Figure 6-20 shows a unique case of a mixed building in Imgdal, featuring rammed earth walls at the ground floor and modern block masonry at the top. In addition to the cracking observed at the corners and between openings, as previously illustrated in Figure 6-9 and Figure 6-18, the façade wall exhibits horizontal cracking along the construction joints between the rammed earth blocks spanning its whole length. It is difficult to determine whether this type of damage corresponds to sliding between rammed earth blocks across their construction joints or to out-of-plane bending. The specific floor typology is unknown, as internal inspection of the building was not feasible. The exposed timber joists, revealed due to the loss of plaster, suggest the presence of a traditional floor, although it remains uncertain whether it has been retained or removed during the works for the vertical extension.



Figure 6-20 : Building in Imgdal (15 km from epicenter) with rammed earth walls on the ground floor and a vertical extension in modern block masonry at the top floor (credit M. Devaux).

6.3 Conclusion

Earthen structures exhibited significant damage, often resulting in partial collapse of walls and floors. The most common failure mechanism observed was the out-of-plane wall overturning with separation of orthogonal walls. Construction joints, between rammed earth blocks or different earthen materials, introduced weak points where cracks formed. Similar to stone masonry structures, the traditional floor system did not provide a box-like behavior due to its flexibility and inadequate connection with the surrounding walls. Structural alterations were typically limited to local repairs using earthen materials, as the use of modern construction materials was uncommon in the inspected vernacular earthen structures. It is important to note that only a small number of vernacular earthen structures were inspected in the visited rural areas.

7. Bâtiments transformés (hybrides)

Mylène Devaux

7.1 Introduction

De manière globale, un grand nombre des bâtiments observés durant la mission de reconnaissance post-sismique au Maroc ont été transformés à une ou plusieurs reprises depuis la construction initiale d'une partie du bâtiment. En effet, il semble relativement courant pour les propriétaires (principalement dans les zones rurales) de construire leur bâtiment en plusieurs étapes.

Cette manière de procéder fonctionne relativement bien avec le système constructif constitué d'une ossature porteuse en béton armé (portiques) qui encadre de la maçonnerie (qu'il s'agisse d'une maçonnerie de remplissage, confinée ou faiblement confinée). Ce type de constructions a été observé à plusieurs reprises durant la mission de reconnaissance et mis en évidence par E. Lattion (§4.2.1).

S. Saloustros et Y. Zhu ont mis en évidence dans les chapitres précédents (§5 et §6) que plusieurs bâtiments construits en maçonnerie de pierre naturelle et/ou en pisé avaient également été transformés durant leur vie. Entre autres, il a été relevé que le béton armé (généralement combiné avec des éléments en maçonnerie de briques) a été fortement utilisé pour surélever des bâtiments (§5.2.4) ou encore pour remplacer des planchers traditionnels plus légers (§5.2.3). Les dommages observés suite au séisme « Al Haouz » ont clairement mis en évidence l'impact défavorable de ces combinaisons de matériaux sous action sismique.

Outre les bâtiments transformés avec des éléments en béton armé (généralement combinés avec de la maçonnerie de briques), nous avons pu observer des bâtiments fortement transformés, notamment des murs combinant plusieurs types de maçonnerie différents, des éléments en béton armé et des blocs de pisé.

7.2 Dommages sismiques observés

L'interface entre les différents matériaux génère inévitablement une zone de faiblesse structurelle ; la vulnérabilité sismique de ces bâtiments hybrides en est forcément augmentée.

Le bâtiment de la Figure 7-1 (situé à Amizmiz) est composé de deux types de matériaux/structures, à savoir : (1) une structure en maçonnerie de pierre naturelle à deux parements qui paraît relativement ancienne et (2) une extension (ou un renforcement) réalisée avec du béton armé (ossature) et de la maçonnerie de briques qui paraît faiblement confinée.

Figure 7-1 : Bâtiment existant en maçonnerie par le biais d'une structure en ossature en béton armé et remplissage en maçonnerie (crédit M. Devaux).



Bien que le mode de ruine et les raisons exactes de ce dernier ne soient pas identifiables de manière univoque, on observe un endommagement significatif le long de l'interface entre la structure « maçonnerie de pierre naturelle » et celle en béton armé-maçonnerie de briques.

D'autres types de constructions fortement hybrides ont été relevés. A titre d'exemple, nous avons pu observer un bâtiment présentant des dommages importants suite au séisme (Figure 7-2) dans le village d'Imgdal (env. 20 km de l'épicentre) et présentant des dommages significatifs à la jonction entre différents types de matériaux. Notamment, on distingue principalement deux fissures subhorizontales (Figure 7-2, gauche) et une dislocation importante de la structure, en particulier de la façade latérale (Figure 7-2, droite).



Figure 7-2 : *Imgdal: bâtiment transformé et fortement hybride endommagé par le séisme (crédit M. Devaux).*

En observant de plus près ces fissures, on constate que la première fissure subhorizontale (Figure 7-2, gauche) depuis le bas se trouve entre deux « assises » de blocs de pisé et la deuxième fissure (au-dessus de la première) sépare a priori une « assise » de blocs de pisé et de la maçonnerie de pierre naturelle. En revanche, la partie supérieure de la façade « côté route » semble étonnamment peu endommagée. Grâce à l'observation de la façade perpendiculaire (Figure 7-2, droite), il semblerait que la partie supérieure du bâtiment soit construite avec une ossature en béton armé et de la maçonnerie de remplissage. Il est cependant étonnant de ne pas identifier de dommages significatifs au niveau de l'interface supposée entre la structure en béton armé (avec maçonnerie de remplissage) et les quelques assises de maçonnerie de pierre naturelle. Sur la façade perpendiculaire (Figure 7-2, gauche), les dommages sont manifestes à l'interface entre la structure en béton armé/maçonnerie de remplissage (partie supérieure du bâtiment) et le reste de la structure ; à noter que la partie supérieure du bâtiment semble très endommagée à l'arrière du bâtiment (Figure 7-2, droite).

On observe également une fissure subverticale au niveau de l'angle gauche du bâtiment (voir §6.2.2), témoin d'une faible connexion entre les deux murs perpendiculaires.

Des bâtiments présentant des combinaisons de maçonnerie en pierre naturelle avec de la maçonnerie d'adobe ont également été observés ; un bâtiment illustrant une telle situation est présenté sur la Figure 7-3. Dans ce dernier, on observe également divers types de planchers (planchers relativement lourds en matériaux cimentaires et des planchers plus légers et plus traditionnels en bois) et des murs adjacents. A priori, il semblerait que la zone supérieure du mur (1^{er} étage et a priori composé de maçonnerie de type adobe) ait subi un basculement hors-plan. Les appuis perpendiculaires de cette partie du mur semblent faibles, pas assez nombreux et probablement mal placés pour empêcher le basculement de la partie supérieure du

bâtiment. Cependant, le changement de maçonnerie au niveau du plancher sur rez-de-chaussée a probablement fragilisé le mur et a très vraisemblablement contribué à l'activation du mécanisme de ruine hors-plan observé. En outre, l'irrégularité importante en plan et en élévation de la structure porteuse et stabilisatrice du bâtiment est importante et a assurément augmenté significativement la vulnérabilité sismique du bâtiment.



Figure 7-3 : Marrakech, Médina: bâtiment ancien hybride (probablement transformé à plusieurs reprises) et endommagé par le séisme (crédit M. Devaux).

Nous avons également pu identifier plusieurs bâtiments endommagés dont la structure porteuse était composée de matériaux très divers avec des parements distincts (i.e. qui n'ont pas été construits de manière connectée) à l'intérieur de l'épaisseur d'un même mur, à l'image de ce Riad qui a été fortement endommagé (Figure 7-4, droite). Dans le cas précis de cette structure, il est difficile d'évaluer l'impact de l'hétérogénéité structurelle sur les dégâts observés.



Figure 7-4 : Marrakech, Médina: Riad endommagé ; vue globale de la structure endommagée du Riad (gauche). A droite : état d'une partie de la structure endommagée, liée à l'aile droite du Riad (crédit M. Devaux).

7.3 Conclusion

De nombreux bâtiments observés, principalement dans les zones rurales, ont été construits en plusieurs étapes, que ce soit par le biais de surélévations et/ou d'extensions ; la plupart de ces transformations ont été effectuées avec des éléments d'ossature en béton armé (généralement combinés avec de la maçonnerie de briques sous forme de remplissage ou partiellement confinée). Dans de nombreuses situations, ce mode de transformation a été appliqué sur des bâtiments initialement construits avec des matériaux différents, par exemple des murs en maçonnerie (pierre naturelle, briques terre cuite ou encore adobe) ou des murs en pisé (blocs). Des transformations combinant différents types de maçonnerie ont également été relevées dans les éléments porteurs verticaux de plusieurs bâtiments.

Concernant les éléments porteurs horizontaux, nous avons relevé à plusieurs reprises des planchers traditionnels transformés et alourdis avec, par exemple, des matériaux cimentaires.

Pour l'écrasante majorité des bâtiments ayant subis des transformations et endommagés par le séisme d'Al Haouz, les fissures ou dislocations observées correspondent aux limites ou interfaces entre deux matériaux différents (y inclus des types de maçonnerie différents). Aussi, dans la majorité des cas, les mécanismes de ruine activés sont clairement imputables à des changements de matériaux dans la structure stabilisatrice et/ou des modifications de la structure générant une irrégularité importante du système de stabilisation et/ou de la répartition des masses.

8. Bâtiments historiques

Mylène Devaux

8.1 Introduction

L'architecture vernaculaire est un type d'architecture communément répandu dans un pays ou un territoire donné, à une époque donnée (*Wikipedia*³). Dès lors, il s'agit d'une architecture fortement influencée par la culture locale ainsi que les caractéristiques de l'environnement.

Le territoire marocain étant vaste et culturellement riche, on y retrouve plusieurs types de bâtiments vernaculaires selon l'endroit considéré. En effet, par exemple, les bâtiments de construction traditionnelle dans le Haut Atlas diffèrent fortement de ceux construits à Casablanca ou encore à Marrakech. L'habitat vernaculaire du Haut-Atlas est composé de murs essentiellement construits avec des blocs de pisé (ce type d'habitat a par ailleurs fait l'objet du chapitre 6), alors que les bâtiments traditionnels dans la ville de Marrakech sont construits avec de la maçonnerie de pierre naturelle ou d'adobe. Dans les deux cas de figures, les planchers sont relativement légers et ont une faible rigidité membranaire.

Le séisme « Al Haouz » a endommagé et détruit plusieurs monuments historiques, principalement dans les provinces de Marrakech, Ouarzazate, Taroudant et Tinghir. Etant donné que la mission de reconnaissance s'est bornée à la province de Marrakech, le présent chapitre traitera des bâtiments historiques observés sur ce territoire, à savoir : les bâtiments sacrés (mosquées), le palais Bahia (Marrakech) ainsi que les bâtiments que l'on retrouve dans la Médina de Marrakech.

8.2 Bâtiments sacrés

Durant la mission de reconnaissance, plusieurs mosquées et minarets ont fait l'objet d'une visite extérieure (il n'a pas été possible d'entrer dans ces bâtiments) et les dégâts observés sont présentés ci-après.

Les minarets, du fait de leur structure élancée, présentent des caractéristiques dynamiques particulières. En particulier, leur relative faible rigidité fait que leur période fondamentale est généralement et relativement plus longue que celle du corps de la mosquée à laquelle le minaret est lié (cela ne signifie pas pour autant que leur période fondamentale est longue). Dès lors, il est fréquent d'apercevoir des fissures à l'interface entre la structure du minaret et celle de la mosquée. Selon la connexion entre les deux parties de bâtiment et le contenu fréquentiel des ondes sismiques sollicitant l'ouvrage, on peut observer des fissures verticales le long des zones composant l'interface ou des fissures subhorizontales et obliques plus ou moins à la hauteur de la toiture du bâtiment composant la mosquée.

Sur les photographies suivantes (Figure 8-1), on peut observer des fissures subhorizontales, verticales et obliques sur au moins (le dernier côté n'ayant pas pu être correctement observé) trois côtés et ce, dès le rez-de-chaussée du minaret. En particulier, on observe que le premier étage est fortement endommagé sur deux côtés avec des éléments verticaux en béton armé cisailé (Figure 8-1, gauche) et c'est la face du rez-de-chaussée qui est endommagée pour le troisième côté (Figure 8-1, droite). La configuration des fissures laisse supposer que (1) la structure que l'on voit à droite sur les photographies ci-dessous est fortement connectée à celle du minaret, (2) que la sollicitation sismique a été importante dans les deux directions

³ https://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_vernaculaire (consulté le 05.04.2024).

(hypothèse vérifiée par les dégâts observés sur les bâtiments aux alentours) et que (3) ce minaret a été construit en ossature béton armé avec de la maçonnerie de remplissage plus ou moins confinée. Malheureusement, nous n'avons pas d'informations liées au contenu fréquentiel de la sollicitation sismique dans la région de Toufssirine, ni plus localement autour du minaret (§2.3).



Figure 8-1 : Vues de trois côtés du minaret de Toufssirine (crédit M. Devaux)



Figure 8-2 : Vues zoomées de trois côtés du minaret de Toufssirine (crédit M. Devaux).

D'autres minarets ont subi d'importants dommages, à l'instar du minaret d'une mosquée d'Amizmiz (Figure 8-3). Sur la base des observations effectuées sur les murs de la mosquée et à partir des photos ci-dessous, il semblerait que la structure du minaret soit composée d'une ossature en béton armé avec de la maçonnerie de remplissage en deux parements (ce type de structure a également été observé pour la mosquée se trouvant à El Baraka (Figure 8-5) qui semble assez récente).



Figure 8-3 : Gauche/milieu : vue d’une mosquée d’Amizmiz – et de son minaret - juste après le séisme (Source : alamy) et quelques mois après. Droite: vue de la même mosquée lors de la mission de reconnaissance post-sismique (crédit M. Devaux).

Parmi les autres minarets qui ont été fortement endommagés, on retrouve un des minarets de la place Jemaa El Fna, inscrite au patrimoine mondial de l’Unesco (Figure 8-4).



Figure 8-4 : Minaret de la Place Jemaa El Fna. Gauche : avant le séisme (source : alamy). Milieu : après le séisme (source : RTL/Julie Brault). Droite : après le séisme, 26.11.2023 (crédit M. Devaux).

A l’image de tous les minarets endommagés observés, les dommages se concentrent dans la partie supérieure de la structure, généralement au-dessus de la zone entravée par des structures adjacentes.

Nous avons également visité la mosquée située à El Baraka (situé à une vingtaine de kilomètres de l’épicentre) ; cette dernière présentait des dégâts importants dans les éléments de remplissage des contreforts (a priori uniquement présents pour des raisons esthétiques car complètement déconnectés du reste de la structure) et des murs extérieurs (Figure 8-5, Figure 8-7). En outre, on observe de nombreuses fissures verticales sur les murs entre les contreforts, laissant entrevoir des interfaces entre deux types de structures (Figure 8-6). L’observation plus approfondie des dégâts a permis de mettre en évidence une structure porteuse de l’édifice (probablement récent) composée d’une ossature en béton armé avec des éléments de remplissage composés de deux parements.



Figure 8-5 : Dégâts observés sur la structure de la mosquée d'El Baraka (vue d'un angle de la mosquée (gauche) et d'un parement endommagé d'un côté de l'angle (droite) (crédit M. Devaux).



Figure 8-6 : Vues de l'intérieur du parement (crédit E. Lattion)

Aussi, une fissure importante a été observée à l'interface entre le minaret et le reste de la mosquée ; outre quelques fissures verticales à l'interface entre l'ossature en béton armé et la maçonnerie, aucun dégât significatif n'a pu être identifié sur le reste de la structure du minaret depuis le sol (Figure 8-7).



Figure 8-7 : Vue de la connexion entre le minaret et le reste du bâtiment (présence d'une fissure verticale importante, plus visible sur l'agrandissement d'une partie de la photographie, à droite) (crédit M. Devaux).

A Marrakech, nous avons pu observer depuis l'extérieur les deux mosquées les plus importantes de la ville, à savoir la Koutoubia et la Kasbah ; ces dernières présentent des dégâts au pinacle de leur minaret (selon certains témoins, les escaliers d'accès au pinacle de la mosquée de La Koutoubia auraient également été endommagés) et, dans les deux cas, ces éléments ont été confortés par des mesures prises (sous la forme d'un ceinturage) rapidement après le séisme (Figure 8-8, Figure 8-10).

La construction de la mosquée de La Koutoubia, qui semble avoir débuté au XII^{ème} siècle (*Wikipédia*⁴), est basée sur un plan arabe hypostyle, i.e. que l'espace s'articule autour d'une grande cour (*sahn*) plus ou moins centrée et entourée d'un portique. Les 17 nefs sont perpendiculaires au mur de *qibla* et la structure porteuse est composée de suites d'arcades avec des arcs outrepassés sur piliers (voir plan de la Figure 8-9). Le minaret de La Koutoubia est haut de 80 m environ et a une section carrée d'environ 13 m de côté.



Figure 8-8 : La Koutoubia, vue partielle du mur sud-est (gauche) et vue de la façade nord-ouest (droite). Pour les directions cardinales, se référer au plan de la Figure 8-9 (crédit M. Devaux).

Les murs nord-ouest ainsi que certains murs de la façades sud-est de la mosquée de La Koutoubia ont été confortés rapidement après le séisme afin d’assurer leur stabilité (Figure 8-8). Aussi, les éléments supérieurs des tourelles de la façades sud-est ont été confortés par des ceinturages ; ces derniers ont probablement été mis en place pour assurer l’appui de voûtes (leur présence semble corroborée par le plan de la Figure 8-9).



Figure 8-9 : Vue du ceinturage des sommets des tourelles de la façade sud-est (gauche) (crédit M. Devaux) ; plan schématique de la mosquée de La Koutoubia (source : Wikipedia⁴).

A l’image de la mosquée La Koutoubia, on retrouve également une mesure de confortement de première urgence sur le pinacle du minaret de la mosquée de La Kasbah (Figure 8-10).

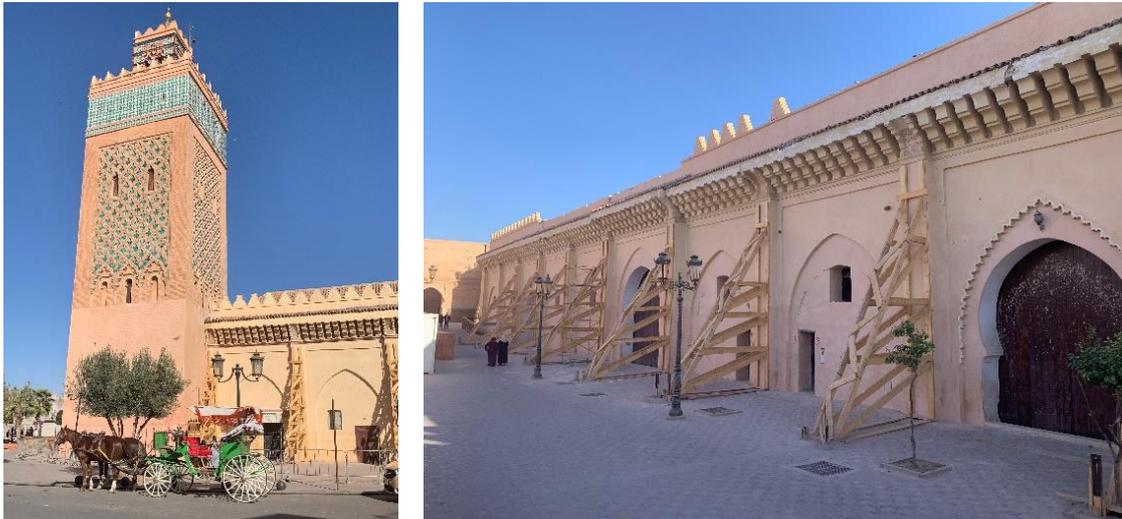


Figure 8-10 : La Kasbah, vue du minaret et d’un côté de la mosquée (crédit M. Devaux).

La mosquée La Kasbah semble avoir également été construite au XII^{ème} siècle (Wikipédia⁵). Son plan presque carré, hypostyle, s’articule autour d’une grande cour rectangulaire centrale avec quatre petites cours auxiliaires ou secondaires à ses coins. A l’instar de la mosquée La Koutoubia, la structure porteuse de la mosquée La Kasbah est composée de séries d’arcades composées d’arcs outrepassés sur piliers (voir plan de la Figure 8-11). Le minaret de La Kasbah, qui est haut de 80 m environ et a une section carrée d’environ 9 m de côté, semble avoir un

⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Kutubiyya_Mosque (consulté le 05.04.2024).

socle (jusqu'au niveau de la toiture de la mosquée) construit en maçonnerie de pierre naturelle et le reste de la structure en maçonnerie de briques (*Wikipédia*⁵).

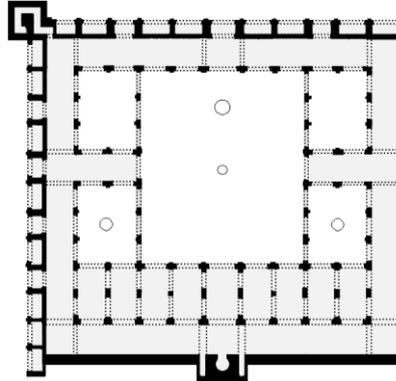


Figure 8-11 : Plan schématique de la mosquée de la Kasbah (source : *Wikipédia*⁵)

Contrairement à la mosquée de La Koutoubia, les étayages de première urgence ont été placés non pas le long des murs extérieurs, mais au niveau d'éléments structuraux ressemblant à des contreforts. En se basant sur le plan de la mosquée de La Kasbah (Figure 8-11), on constate que la configuration structurelle de cette mosquée diffère significativement de celle de La Koutoubia.

En outre, les murs extérieurs actuels (sur deux côtés de la mosquée) semblent avoir été construits ultérieurement à la construction de la mosquée, en parallèle aux murs existants et perpendiculaire à des arcades, afin de ménager un espace/volume pour des échoppes (traits tillés sur le plan de la Figure 8-11). Au vu des étayages disposés (Figure 8-10), ces arcades semblent présenter une vulnérabilité sismique importante. Sans renseignement supplémentaire concernant la structure de l'édifice, il n'est malheureusement pas possible d'approfondir la problématique.

Outre les murs étayés, le minaret de La Kasbah a pu être observé d'assez près et une fissure significative a été identifiée dans la partie supérieure du minaret (Figure 8-12). Néanmoins, aucun dégât visible n'a été observé à l'interface entre le minaret et le reste de la structure, ni en hauteur, à la jonction avec le reste de la structure de la mosquée.

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Kasbah_Mosque,_Marrakesh (consulté le 05.04.2024).

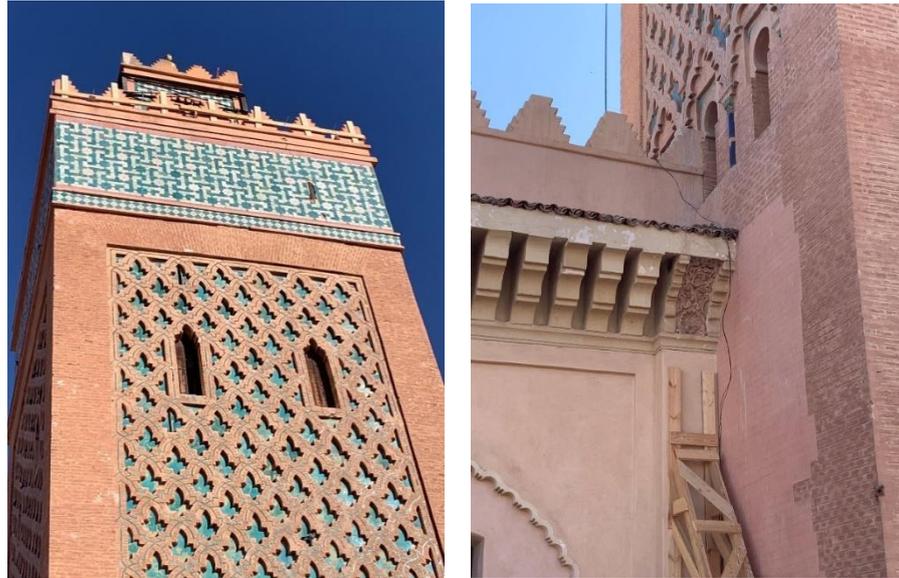
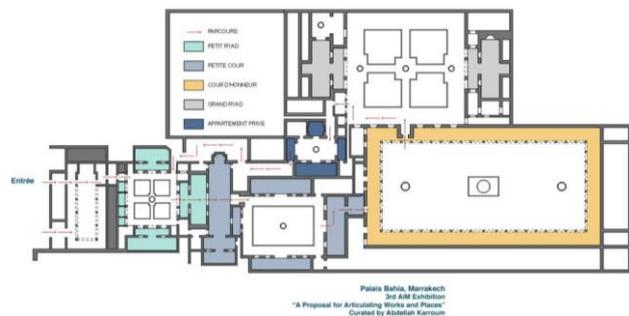


Figure 8-12 : Droite : La Kasbah - vue de la fissure sur la partie supérieure du minaret ; Gauche : pas de dégâts significatifs observés à l'interface (crédit M. Devaux).

8.3 Palais de la Bahia

Le Palais de la Bahia, qui a été construit vers 1880 et se trouve dans la Médina de Marrakech, est constitué d'une succession enchevêtrée de pièces, d'appartements, de cours et de jardins.

Figure 8-13 : Plan schématique du Palais de la Bahia, Marrakech. (source web⁶)



L'ensemble est principalement composé d'un seul étage avec une hauteur de plafond assez importante. Les murs sont à priori constitués de maçonnerie : des murs pleins entourent généralement les pièces, alors que des arcades également en maçonnerie entourent les cours et les jardins intérieurs. La structure porteuse des plafonds est constituée d'une charpente ; cette dernière soutient des plafonds richement travaillés. Durant la rapide visite que nous avons effectuée de ce splendide monument, nous avons appris que les fontaines des cours intérieures avaient été fortement endommagées par le séisme. En outre, nous avons pu observer des dommages (fissures essentiellement) sur certaines arcades, en particulier celles du Grand Riad (Figure 8-14). N'ayant pas eu l'accès à ces zones endommagées, il est difficile de discuter de quelques dommages observés. Néanmoins, nous n'avons pas identifié de dégâts structurels majeurs dans ce bâtiment historique.

⁶ <https://www.alksar.com/palais-de-la-bahia-marrakech/> (consulté le 05.04.2024).



Figure 8-14 : Vues d'une zone d'arcades endommagée (vue globale à gauche ; vue locale à droite). (crédit M. Devaux).

8.4 Bâtiments de la Médina de Marrakech

La majorité des bâtiments de la Médina (résidentiels ou d'affectation mixte résidentielle - commerciale) sont construits en maçonnerie d'adobe, de pierre naturelle ou une combinaison de ces deux matériaux. Ces bâtiments sont généralement composés d'un à trois étages avec des planchers traditionnels relativement souples. Au sein de la vieille cité, ces bâtiments sont juxtaposés les uns aux autres ; il en résulte des positions typiques de bâtiments dits « à l'intérieur » d'une rangée de bâtiments, à l'extrémité d'une rangée ou encore à l'angle de deux rangées. La vulnérabilité sismique d'un bâtiment (ou d'un ensemble de bâtiments) dépend de la position de ce dernier par rapport aux bâtiments adjacents, des caractéristiques dynamiques de ces derniers et de la connexion entre eux. Malheureusement, la Médina de Marrakech étant particulièrement dense, il a été possible d'évaluer, par l'unique biais de l'observation des dommages, ni l'impact de la position des bâtiments sur leur vulnérabilité sismique, ni l'impact de l'interaction dynamique des bâtiments entre eux.

Néanmoins, les dommages observés nous ont tout de même permis d'identifier des chaînages d'angle faibles, principalement liés à une maçonnerie composée de parpaings de petites dimensions (Figure 8-15). Le type d'échafaudage rapidement mis en œuvre pour stabiliser les murs des bâtiments indique que la problématique parasismique principale de ces bâtiments est la vulnérabilité hors-plan des murs, comme on peut le voir sur les photographies ci-dessous.



Figure 8-15 : Différents étayages (mesures provisoires) mis en œuvre suite au séisme dans la Médina de Marrakech (crédit M. Devaux).

8.5 Conclusion

Nombreux sont les minarets qui ont fortement soufferts du séisme Al Haouz. Sans aborder l'impact certain du type de construction des éléments structuraux (i.e. ossature en béton armé avec maçonnerie de remplissage ou partiellement confinée, maçonnerie avec briques de terre crue ou terre cuite, etc.) sur la vulnérabilité sismique des minarets, leur élancement généralement important ainsi que le type de leur connexion avec le reste de la structure de la mosquée expliquent globalement la configuration des dommages générés et le type de mécanisme de ruine activé.

Nous avons pu observer un certain nombre de minarets présentant des dommages modérés globalement (mais pas systématiquement) constitués de fissures subverticales le long de leur connexion avec le reste de la structure de la mosquée. Aussi, la partie sommitale (pinacle) présente, pour la majorité des cas observés, des dégâts significatifs nécessitant la mise en œuvre de mesures d'urgence de ceinturage. Dans les cas de minarets présentant des dommages sensibles à importants, nous avons observé des fissures importantes de cisaillement endommageant la structure sur toute sa hauteur au-dessus de la connexion avec la structure de la mosquée et/ou d'un appui linéaire généré par un autre corps de bâtiment. Nous n'avons pas pu observer de minarets fortement endommagés (DG4, DG5) car ces derniers ont rapidement été déconstruits après le séisme pour d'évidentes raisons de sécurité.

Nous ne pouvons pas établir de retours concernant d'éventuels dommages sismiques sur les éléments de structure se trouvant à l'intérieur de mosquées, car nous n'avons pas eu la possibilité d'entrer dans ces monuments. En revanche, les étayages de stabilisation mis en œuvre après l'événement sismique de début septembre 2023 sur certains murs périphériques (en maçonnerie) de quelques mosquées anciennes nous permettent de déduire que des mécanismes de basculement hors-plan ont été activés.

9. Conclusions

Hamza Sehaqui

L'objectif principal de la mission de reconnaissance organisée au Maroc était d'analyser l'impact du séisme d'Al Haouz dans un pays doté de normes parasismiques et présentant, avant l'avènement de ce tremblement de terre, une sismicité comparable à celle de la Suisse. En plus des conclusions sur les différents aspects techniques dans les chapitres précédents, les conclusions suivantes sur les aspects administratifs, organisationnels et normatifs peuvent être tirées :

– Aspect organisationnel

La période de réalisation de la mission, soit environ deux mois et demi après le tremblement de terre, s'est révélée intéressante dans la mesure où les phases d'opérations de secours, de relogement provisoire et d'aide à la population locale étaient achevées. Malgré l'étendue de la zone sinistrée et les opérations de démolition et de reconstruction nécessitant beaucoup de temps, une variété de dommages demeurait observable sur les bâtiments et les infrastructures. Le choix de séjourner à Marrakech, à environ 70 km de l'épicentre, et de réaliser les trajets jusqu'aux zones proches de celui-ci a permis de traverser les villages présentant des dommages d'intensités différentes.

– Solidarité et gestion post-sismique

Le séisme d'Al Haouz a déclenché un grand mouvement de solidarité au sein de la population. Dès les premières heures suivant la catastrophe, des initiatives locales et nationales, à l'image de l'initiative « Rebuild », ont été mises en place pour venir en aide aux victimes et soutenir les zones touchées. Des organisations gouvernementales ainsi que des citoyens bénévoles se sont mobilisés pour apporter un soutien aux sinistrés. Des opérations de secours ont été coordonnées pour fournir des abris temporaires, des vivres, de l'eau potable, des médicaments et d'autres fournitures essentielles aux personnes affectées.

L'une des principales problématiques rencontrées par les équipes de secours a été l'accès aux zones sinistrées. Les dégâts provoqués par le séisme ont conduit à des blocages routiers, dus à des glissements de terrain, entravant considérablement la capacité des secours à atteindre les zones touchées. Cette situation souligne l'importance de développer des plans d'urgence et des mécanismes de coordination pour assurer un accès rapide des secours dans les zones difficiles d'accès.

– Contexte sismologique

Le séisme d'Al Haouz a généré des intensités de mouvement du sol atteignant le niveau VIII près de l'épicentre, avec des accélérations du sol dépassant les prévisions établies par les équations prédictives des pics de mouvement du sol. À la suite des observations de l'équipe SGEB, le séisme et les répliques qui ont suivi ont provoqué des dommages d'intensités différentes soulignant les effets de site variables d'une région à une autre (principalement les effets géologiques et topographiques). La compréhension de l'interaction des ondes sismiques avec les spécificités de chaque site est essentielle dans la région d'Al Haouz, qui a connu ce séisme sans précédent, pour guider la conception et le dimensionnement des ouvrages en toute sécurité.

– **Dommages structurels et règlements RPS et RPCT**

Le séisme d'Al Haouz a mis en évidence l'importance des normes parasismiques dans la protection des structures contre les tremblements de terre. À Marrakech, par exemple, où les secousses ont été significatives, ce sont principalement les bâtiments situés dans la vieille ville, construits avant l'entrée en vigueur des normes, qui ont été les plus impactés. Selon nos connaissances, aucun effondrement de structures récentes n'a été signalé dans la ville de Marrakech. Ces événements soulignent également l'importance de renforcer l'application des normes dans les zones rurales qui ont été les plus touchées.

Les normes RPS et RPCT couvrent une grande partie des typologies de construction rencontrées au Maroc et sont adaptées pour les nouvelles structures. Des normes et stratégies de renforcements des structures existantes, particulièrement les structures construites avant l'entrée en vigueur des normes, pourraient aider à définir le degré de renforcement nécessaire pour chaque type structure selon son importance, son degré de vulnérabilité ainsi que d'autres critères.

10. Références

- Aït Brahim, L., Chotin, P., Hinaj, S., Abdelouafi, A., et al. (2002). Paleostress evolution in the Moroccan African margin from Triassic to Present. *Tectonophysics*, 357(1–4), 187–205.
- Ambroggi R. and Thuille G. (1952). Haouz de Marrakech. *Hydrogéologie du Maroc. Catalogue des produits du Service Géologique du Maroc*, n° 97.
- Chalouan, A., Gil, A.J., Chabli, A., Bargach, K., Liemlahi, H., et al. (2023). cGPS Record of Active Extension in Moroccan Meseta and Shortening in Atlasic Chains under the Eurasia-Nubia Convergence. *Sensors* 2023, 23, 4846. <https://doi.org/10.3390/s23104846>.
- Cheloni, D., Famiglietti, N. A., Tolomei, C., Caputo, R., & Vicari, A. (2024). The 8 September 2023, MW 6.8, Morocco earthquake: A deep transpressive faulting along the active high Atlas mountain belt. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106992. <https://doi.org/10.1029/2023GL106992>.
- Cherkaoui T.-E. & El Hassani A. (2012). Seismicity and Seismic Hazard in Morocco: 1901-2010. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 2012, n° 34, p. 45-55.
- CSN (2023). Catalan Seismic Network. <https://doi.org/10.7914/SN/CA>.
- Ferrandini, J. & Le Marrec, A. (1982). La couverture jurassique à paléogène du Haut Atlas de Marrakech est allochthone dans la "zone des cuvettes" d'Ait Ourir (Maroc). — *C. R. Acad. Sci. Paris, (II)*, 295, pp 813–816, Paris.
- GE3D (2023a). Google Earth V 10.49.0.0 (online). Data attribution 9 September, 2023. Amizmiz & Tafeghaghte, Morocco. Distance scale 500 m. Camera : 3,803 m 31°12'48"N 8°16'55"W 1,221 m. Google LLC 2023. <http://www.earth.google.com/web/> [Retrieved on February 26, 2024].
- GE3D (2023b). Google Earth V 10.49.0.0 (online). Data attribution 9 September, 2023. Toufssirine, Morocco. Distance scale 200 m. Camera : 1,827 m 31°19'55"N 7°57'29"W 976 m. Google LLC 2023. <http://www.earth.google.com/web/> [Retrieved on February 26, 2024].
- GE3D (2023c). Google Earth V 10.49.0.0 (online). Data attribution 9 September, 2023. Talat N'Yaaqoub, Morocco. Distance scale 100 m. Camera : 1,697 m 30°58'50.16"N 8°11'57"W 1,287 m. Google LLC 2023. <http://www.earth.google.com/web/> [Retrieved on February 26, 2024].
- GE Amizmiz (2022). Google Earth Pro V 7.3.6.9750. Imagery date 28 December, 2022. Amizmiz, Morocco. 31°12'55.75" N 8°14'00.54" W, elev 985 m, eye alt 1.67 km. Airbus 2024. [Retrieved on February 26, 2024].
- GE Amizmiz (2023). Google Earth Pro V 7.3.6.9750. Imagery date 9 September, 2023. Amizmiz, Morocco. 31°12'55.75" N 8°14'00.54" W, elev 985 m, eye alt 1.67 km. Airbus 2024. [Retrieved on February 26, 2024].
- GE Tafeghaghte (2022). Google Earth Pro V 7.3.6.9750. Imagery date 28 December, 2022. Tafeghaghte, Morocco. 31°11'48.16" N 8°13'26.02" W, elev 1172 m, eye alt 1.53 km. Airbus 2024. [Retrieved on February 26, 2024].

GE Tafeghaghte (2023). Google Earth Pro V 7.3.6.9750. Imagery date 9 September, 2023. Tafeghaghte, Morocco. 31°11'48.16" N 8°13'26.02" W, elev 1172 m, eye alt 1.53 km. Airbus 2024. [Retrieved on February 26, 2024].

GE Talat N'Yaaqoub (2022). Google Earth Pro V 7.3.6.9750. Imagery date 28 December, 2022. Talat N'Yaaqoub, Morocco. 30°59'22.92" N 8°11'01.40" W, elev 1228 m, eye alt 1.92 km. Airbus 2024. [Retrieved on February 26, 2024].

GE Talat N'Yaaqoub (2023). Google Earth Pro V 7.3.6.9750. Imagery date 9 September, 2023. Talat N'Yaaqoub, Morocco. 30°59'22.92" N 8°11'01.40" W, elev 1228 m, eye alt 1.92 km. Airbus 2024. [Retrieved on February 26, 2024].

Grünthal, G., Musson, R. M. W., Schwartz, J., & Stucchi, M. (1998). European Macroseismic Scale 1998 (Vol. 15). Luxembourg: Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.

Koulali, A., Ouazar, D., Tahayt, A., King, R. W., et al. (2011). New GPS constraints on active deformation along the Africa-Iberia plate boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 308(1–2), 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.05.048>.

Leatherby, L., Hernandez, M., Reinhard, S., Shao, E., Yourish, K., & Zhang, C. (2023). Maps: Where the Earthquake Struck Morocco. Published in *The New York Times* on Sep. 10, 2023. <https://www.nytimes.com/interactive/2023/09/09/world/africa/morocco-earthquake-damage.html>, last accessed on 10th March 2024.

Michard, A., Hoepffner, C., Soulaïmani, A., & Baidder, L. (2008). The variscan belt. In *Continental evolution: The geology of Morocco* (pp. 65–132). Springer, Berlin, Heidelberg.

Moussaid, B., El-Ouardi, H., Casas-Sainz, A.M., Pocoví, A., Román-Berdiel, T., et al. (2023). The Geological Setting of the Moroccan High Atlas and Its Plate Tectonics Context. *Springer Geol*, pp. 1-74, https://doi.org/10.1007/978-3-031-16693-8_1.

MVBSN (2023). The Mediterranean Very Broadband Seismographic Network. Network DOI: <https://doi.org/10.13127/SD/fBBtDtd6q>.

RPCTerre (2011). Règlement Parasismique des Constructions en Terre, Ministère de l'intérieur, Ministère de l'équipement et du transport, ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la politique de la ville.

RPS 2000 (2011). Règlement de Construction Parasismique. Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de l'Aménagement de l'Espace : Rabat, Morocco, 2011. <https://www.sodibet.com/telechargement/RPS2011.pdf>.

SDSN (2023). Spanish Digital Seismic Network. <https://doi.org/10.7914/SN/ES>.

SIA (2020). SIA 261 Einwirkungen auf Tragwerke (in German): Swiss Society of Engineers and Architects. Available at: <http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/sia%20261/d/2020/D/Product/> (Accessed March 5, 2024)

SSN (2023). Switzerland Seismological Network. <https://doi.org/10.12686/sed/networks/ch>.

USGS (2023). M 6.8 - Al Haouz, Morocco. Retrieved from:
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000kufc>, last accessed on 10th
March 2024.

WMSN (2023). Western Mediterranean Seismic Network. <https://doi.org/10.14470/JZ581150>.