

Royaume du Maroc
Ministère de l'Aménagement du Territoire National, de l'Urbanisme,
de l'Habitat et de la Politique de la Ville

– Habitat et Politique de la Ville –
Secrétariat Général
Direction de la Qualité et des Affaires Techniques

DIAGNOSTIC POST-SISMIQUE DES CONSTRUCTIONS DES REGIONS IMPACTEES PAR LE SEISME DU HAUT-ATLAS

FOCUS SUR LES CONSTRUCTIONS EN MATERIAUX LOCAUX

Auteur :

AHMED KOUTOUS

PHD, ENG. GENIE CIVIL [EHTP] | SPECIALITE : MATERIAUX ET TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN MATERIAUX LOCAUX
Enseignant-Chercheur au Département Génie Rural de l'IAV Hassan II – Rabat

Photos :

Ahmed KOUTOUS | Docteur et Ingénieur d'Etat en Génie Civil

Sarah EL AICH | Architecte DENA

LABINA | Association de professionnels et chercheurs de l'écoconstruction

Supervision :

Soraya KHALIL | Directrice de la Direction de la Qualité et des Affaires Techniques

Relecture :

Toufik BENAMRA | Ingénieur d'Etat, Génie Civil

Mohamed DOUALI | Ingénieur d'Etat, Ville et Environnement

Sarah EL AICH | Architecte DENA

Asmae SAHLI | Ingénieur d'Etat, Génie Civil

À
la mémoire
des victimes du séisme
du Haut-Atlas
du 8 septembre 2023

ⵎⴰⵔⴰⵏ ⵉⵏⵏⴰ ⵙⴰⵏⵉⵔ ⵉⵏⵏⴰ ⵙⴰⵏⵉⵔ
[AŽŘU N'TMAZIRT AS EBNNA YAN]

– TRADUCTION –

« *C'est avec la pierre du pays qu'on construit* »

(Proverbe Marocain de l'Atlas)

Remerciements

Nos vifs remerciements vont à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce rapport technique. Nos sincères remerciements s'adresse ainsi à :

Madame le Ministre de l'Aménagement du Territoire National, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Politique de la Ville.

Monsieur le Secrétaire Général du Ministre de l'Aménagement du Territoire National, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Politique de la Ville.

Madame la Directrice de la Direction de la Qualité et des Affaires Techniques.

L'ensemble du personnel de la Direction de la Qualité et des Affaires Techniques.

L'ensemble des membres de l'association « Labina pour une architecture durable » de Marrakech.

Aussi, nos remerciements sont adressés à toutes les personnes et représentants des institutions nationales et organismes professionnels qui ont apporté leur contribution au débat sur la question de la résilience parasismique des constructions en matériaux locaux.

Nos sincères remerciements vont également aux autorités et aux services locaux qui ont facilité le déplacement des équipes et des personnes qui ont participé aux visites des lieux diagnostiqués.

Et, enfin, un grand pardon à Celle/Celui qu'aurait été oublié(e) d'être cité(e), mais qui l'en soit ainsi remercié(e).

Merci à tous.

Abstract

Ce document est un rapport technique consacré au diagnostic post-sismique des constructions impactées par le séisme du 8 septembre 2023. Les constructions diagnostiquées sont celles réalisées en matériaux locaux, c'est-à-dire celles construites en maçonnerie traditionnelle de pierres ou en terre crue (pisé et/ou maçonnerie d'adobes). Le but de ce diagnostic qui reste sommaire compte tenu de son caractère urgent, vise à relever et analyser les dommages typiques de ce type constructions en vue de formuler des recommandations pour la reconstruction de la région impactée par le séisme, de manière à éviter les mauvaises pratiques constructives et encourager les pratiques de la construction parasismique adaptés aux techniques de constructions locales.

La méthodologie adoptée pour réaliser ce diagnostic est basée essentiellement sur l'examen visuel des dommages constatés sur le terrain en comparant les caractéristiques des constructions qui ont été gravement endommagées avec celles des constructions qui ont mieux résisté à l'action sismique. Cette comparaison est faite en termes du site de constructions et des conditions d'implantation, en termes de conception de la structure et en termes de la qualité des matériaux et de leur mise en œuvre.

Les résultats obtenus sont présentés et discutés ont permis de mettre en évidence certaines erreurs typiques qui expliquent en partie l'ampleurs des dégâts constatés que ça soit au niveau de l'implantation, de conception ou de mise en œuvre. Ce travail a également permis de souligner certaines pratiques de constructions locales qui s'avèrent être efficaces de point de vue stabilité parasismique.

Ce rapport est décomposé, en quatre sections principales : la première étant une introduction générale présentant le séisme et la région concernée de manière à contextualiser le travail réalisé. La deuxième section décrit la méthodologie adoptée pour réaliser le diagnostic. La troisième section, elle, est réservée à la présentation et discussion des données recueillies. La quatrième est dernière section est, quant à elle, consacrée aux conclusions et recommandations.

Ce travail n'est pas exhaustif et peut être complété et amélioré davantage en analysant avec plus de rigueur les données qu'il rapporte.

Mots-clés :

Séisme Maroc, Construction parasismique, Diagnostic post-sismique, Matériaux de construction locaux, Maçonnerie de pierres, Pisé, Adobe.

SOMMAIRE

Remerciements	i
Abstract.....	iii
Liste des figures	4
Liste des tableaux	6
1. Introduction générale	7
1.1. Contexte général et objectifs	7
1.2. Le séisme du 8 septembre 2023.....	8
1.3. Les régions impactées	8
1.4. Un peu d'Histoire	9
1.4.1. "Adrar Ndern"	9
1.4.2. Patrimoine architectural.....	10
1.5. Définitions	11
2. Méthodologie et déroulement de l'enquête	13
2.1. Echantillon des constructions diagnostiquées	13
2.2. Sites-douars visités	13
2.3. Moyens et documents utilisés	15
2.3.1. Visite de terrain et examen visuel des constructions	15
2.3.2. Fiche de diagnostic post-sismique	15
2.3.3. Images et photographie	15
2.4. Niveaux du diagnostic	16
2.4.3. A l'échelle d'un site-douar de construction.....	17
2.4.1. A l'échelle d'une construction	17
2.4.2. A l'échelle d'un ouvrage de construction	18
2.5. Données toponymiques	18
2.6. Phases et déroulement du diagnostic	18
3. Résultats et discussions	19
3.1. Constats globaux à l'échelle de la région étudiée	20
3.1.1. Techniques et matériaux de construction.....	20
3.1.1.1. Construction en matériaux locaux.....	20
3.1.1.2. Construction en matériaux industriels conventionnels.....	20
3.1.2. Implantation des sites-douars	23
3.2. Diagnostic à l'échelle d'un site-douar	24
3.2.1. Les sites-douars construits sur terrain incliné	24
3.2.2. Les sites-douars construits sur terrain horizontal	24
3.2.3. Dégâts et effets de sites	24
3.3. Diagnostic à l'échelle d'une construction.....	32

1	3.3.1. Configurations architecturales	32
2	3.3.2. Conditions d'implantation	33
3	3.3.3. Conception en élévation	35
4	3.3.4. Structure des planchers-toitures	37
5	3.3.5. Habillage et finition	38
6	3.4. Diagnostic à l'échelle d'un ouvrage élémentaire	39
7	3.4.1. Les fondations et soubassement	39
8	3.4.2. Les murs porteurs.....	41
9	3.4.3. Les systèmes de renforcement	44
10	3.4.4. Les linteaux et chaînages de couronnement.....	45
11	3.4.5. Le plancher-toiture	46
12	3.5. Les constructions nouvelles.....	47
13	3.5.1. Conception et assistance technique	47
14	3.5.2. Matériaux et techniques de construction	48
15	3.6. Les constructions à caractère patrimoniale	50
16	3.6.1. Note importante	51
17	3.6.2. Les constructions en terre : l'exemple de Tinmel	51
18	3.6.2.1. Site et conditions d'implantation	51
19	3.6.2.2. Architecture et régularité en plan	52
20	3.6.2.3. Matériaux et mise en œuvre.....	53
21	3.6.2.4. Synthèse et conclusions	54
22	3.6.3. Les constructions en pierre : l'exemple d'Agadir Oufella	56
23	3.6.3.1. Site et conditions d'implantation	56
24	3.6.3.2. Conception et configuration en plan	57
25	3.6.3.3. Matériaux et mise en œuvre.....	59
26	3.6.3.4. Parapet crénelé.....	59
27	4. Conclusions et recommandations	61
28	4.1. Synthèse et conclusions	61
29	4.1.1. Sismologie et géologie [SIS]	61
30	4.1.2. Conditions d'implantation des constructions [IMP]	62
31	4.1.3. Conception des constructions [CNC]	62
32	4.1.4. Matériaux et mise en œuvre [EXE]	63
33	4.1.5. Exploitation et entretien [EXP]	63
34	4.1.6. Synthèse non exhaustive.....	64
35	4.2. Recommandations et propositions	65
36	4.2.1. Phasage et planification de la reconstruction	65
37	4.2.2. Assistance technique à la reconstruction	67
38	4.2.2.1. Gestion stratégique de la reconstruction.....	67
39	4.2.2.2. Organigramme de l'assistance technique	68
40	4.2.2.3. Points de contrôle des travaux de reconstruction	69

1	4.2.3. Réhabilitation, restauration et renforcement structural.....	70
2	5. Limitations du diagnostic.....	72
3	Références.....	73
4	Annexes.....	74
5	Annexe A : Fiche de diagnostic post-sismique	75
6	Annexe B : Exemple d'utilisation de la fiche de diagnostic post-sismique	77
7	Annexe C : Proposition d'un planning général pour la reconstruction	80
8	Annexe D : Exemples de constructions entièrement en matériaux locaux	81
9		

Liste des figures

1		
2		
3	Fig. 1 ShakeMap du séisme du Haut-Atlas du 8 septembre 2023	8
4	Fig. 2 : Intensité du séisme ressentie selon l'échelle de Mercalli (d'après USGS).....	9
5	Fig. 3 : Exemple de site montrant des ruines abandonnées d'anciennes constructions (Douar Tassila, Ighil, Al	
6	Haouz).....	10
7	Fig. 4 : Trajet principal suivi par l'Equipe (1).....	14
8	Fig. 5 : Localisation des douars et sites visités par l'Equipe (2).....	14
9	Fig. 6 : Exemples de photos illustrant les trois niveaux de diagnostic	16
10	Fig. 7 : Différents degrés de dégâts causés par un séisme sur une construction	17
11	Fig. 8 : Extension de la construction pendant les dizaines dernières années dans les douars où le terrain	
12	constructible est rare	21
13	Fig. 9 : Exemple de sites-douars dont la construction n'a pas beaucoup évolué pendant les dizaines dernières	
14	années	22
15	Fig. 10 : Introduction massive et anarchique de matériaux de construction conventionnels (Douar Asselda, Asni, Al	
16	Haouz).....	23
17	Fig. 11 : Implantation typiques des groupements d'habitat dans les régions du haut-atlas ([a] : douar Ait Tiouga ;	
18	[b] : Tamsoult ; [c] : Ighfis ; [d] : Algo, Commune Tizi n'Tast, Taroudant)	23
19	Fig. 12 : Exemple de douar implanté sur terrain de faible inclinaison (Douar Ait Oublal, Commune Tizi n'Tast,	
20	Taroudant)	24
21	Fig. 13 : Effondrement total des anciennes constructions en terre réalisées sur pente rocheuse (Douar Tamsoult,	
22	Tizi n'Tast, Al Haouz).....	25
23	Fig. 14 : Effondrement total ou presque des anciennes constructions en terre réalisées sur sol relativement meuble	
24	(Douar Ait-Oublal, Tizi n'Tast, Al Haouz).....	26
25	Fig. 15 : Effondrement total ou presque des anciennes constructions en terre implantées à la limite de terrasses	
26	non stabilisées (Douar Tajgalt, Tafngoult, Taroudant)	27
27	Fig. 16 : Effondrement total ou presque des anciennes constructions en pierre implantées sur pente rocheuse	
28	(Douar Amerzagane, Ighil, Al Haouz)	28
29	Fig. 17 : Effets de site et leurs impacts sur l'ampleur des dégâts constatés sur deux groupements de constructions	
30	très proches l'un à l'autre (Douars Amerzagane et Izarran, Ighil, Al Haouz).....	29
31	Fig. 18 : "L'isolation structurale" des constructions a eu pour conséquence le fait que la plupart des mosquées ne	
32	se sont pas entièrement effondrées (Ici mosquée du douar Amerzagane, Ighil, Al Haouz)	30
33	Fig. 19 : Images-satellites montrant l'ampleur des dégâts causés par le Séisme sur certains sites-douars	31
34	Fig. 20 : Exemple typique de constructions implantées en gradin (Douar Imerchichen, Commune Imi n'Dounit,	
35	Chichaoua).....	32
36	Fig. 21 : Evolution de l'architecture régionale suite à l'introduction de matériaux industriels (commune Iguidi,	
37	Taroudant)	33
38	Fig. 22 : Soubassement en maçonnerie de pierre d'une construction en pisé (Douar Aghllade, Iguidi, Taroudant) .	34
39	Fig. 23 : Exemple de constructions dont les murs porteurs sont simplement posés sur le terrain rocheux sans	
40	aucune dispositions constructive particulière (Douar Amchrajen, Ighil, Al Haouz)	34
41	Fig. 24 : Exemple de mur extérieur exposé aux pressions des terres (douar Aghllade, Iguidi, Taroudant)	35
42	Fig. 25 : Exemple de murs en maçonnerie de pierre où l'on voit l'influence de la forme de la pierre sur la qualité de	
43	mise œuvre	36
44	Fig. 26 : Technique de chaînage en bois massif local (Douar Afella Nouzgrouz, Iguidi, Taroudant)	36
45	Fig. 27 : Eléments de renforcement-chaînage en béton armé appliqués sur des murs en maçonnerie traditionnelle	
46	de pierre (Douar Amchkrajen, Ighil, Al Haouz)	37
47	Fig. 28 : Effondrement partiel d'une toiture traditionnelle montrant ainsi les détails de sa conception	38
48	Fig. 29 : Fissurations dues à l'action sismique très visibles grâce à l'enduit de finition	38
49	Fig. 30 : Exemple de bâtiment sans soubassement (Douar Asselda, Asni, Al Haouz).....	39

1	Fig. 31 : Exemple de murs implanté sur sol rocheux (Douar Assif Lmal, Chichaoua)	39
2	Fig. 32 : Exemple de soubassement réalisé avec chaînage (Ighil centre, Al Haouz)	40
3	Fig. 33 : Exemple de mur de soubassement en gradin (Douar Aghllade, Iguidi, Taroudant)	40
4	Fig. 34 : Exemple de pathologie de murs en adobe (Douar Ouirizen, Tahanaout, Al Haouz)	41
5	Fig. 35 : Exemple de pathologie de mur en pisé (Douar Ighfis, Tizi n'Tast, Taroudant)	41
6	Fig. 36 : Exemple de pathologie liée à l'absence de dispositifs de liaison au niveau des jonctions des murs	42
7	Fig. 37 : Pathologie typique des murs en maçonnerie de pierre liée à l'absence de boutisse de liaison des deux	
8	parois-faces des murs	42
9	Fig. 38 : Irrégularité d'alignement caractéristique des très anciennes constructions (Douar Afella Nouzgrouz, Iguidi,	
10	Taroudant)	43
11	Fig. 39 : Fissuration inclinée à l'endroit des ouvertures dues à l'absence ou l'insuffisance des dispositifs de	
12	renforcement (Douar Afella Nouzgrouz, Iguidi, Taroudant)	43
13	Fig. 40 : Recouvrement des éléments de chaînage en bois non assuré (Douar Amchkarjen, Ighil, Al Haouz)	44
14	Fig. 41 : Continuité de chaînage en béton armé non assuré (Ighil Centre, Al Haouz)	44
15	Fig. 42 : Continuité du linteau sur l'ensemble des ouvertures (Ighil centre, Al Haouz)	45
16	Fig. 43 : Exemple illustrant le rôle important du chaînage de couronnement des murs avant la pose du plancher-	
17	toiture	45
18	Fig. 44 : Effondrement d'un mur en maçonnerie de pierre dû à l'absence de chaînage de couronnement.....	46
19	Fig. 45 : Effondrement d'un mur en pisé en l'absence de chaînage de couronnement (Douar Ighfis, Tizi n'Tast,	
20	Taroudant)	46
21	Fig. 46 : Exemple de planchers-toitures conçues avec des structures porteuses dans les deux directions (Douar	
22	Afella Nouzgrouz, Iguidi, Taroudant)	47
23	Fig. 47 : Exemples de configurations en plan de constructions nouvelles en matériaux locaux.....	48
24	Fig. 48 : La largeurs des ouvertures dans les nouvelles constructions dépassent parfois la limite recommandée...	48
25	Fig. 49 : Dégâts très légers et insignifiants causés par l'action sismique	49
26	Fig. 50 : Construction en deux niveaux réalisés entièrement en maçonnerie en adobe.....	50
27	Fig. 51 : Vue du nord de l'édifice de Tinmel avant sa restauration de 1994 (Source internet : skyscrapercity.com)	51
28	Fig. 52 : Conditions d'implantation des quatre murs de façade de l'édifice « Tinmel » (Image-satellite avant séisme)	
29		52
30	Fig. 53 : Vue en plan de la construction de Tinmel (adaptée à partir de books.openedition.org)	53
31	Fig. 54 : Exemples de dégâts relevés sur place après le Séisme	54
32	Fig. 55 : Images-satellites montrant "Tinmel" avant et après le Séisme	54
33	Fig. 56 : Vue du nord de l'édifice de Tinmel après le Séisme.....	55
34	Fig. 57 : Vue du sud-est de l'édifice de Tinmel après le séisme.....	55
35	Fig. 58 : Vues aériennes d'Agadir Oufella vers fins 1950 (gauche) et post-séisme de 1960 d'Agadir Oufella (droite)	56
36	Fig. 59 : Image-satellite d'Agadir Oufella avant (gauche) et après (droite) les derniers travaux de restauration.....	56
37	Fig. 60 : Différents singularités visibles depuis l'image-satellite	57
38	Fig. 61 : Irrégularités en plan et instabilité de terrain pouvant expliquer l'effondrement partiel de certaines parties	
39	de la muraille	58
40	Fig. 62 : Rectification légère du tracé des parties du murs en courbe comme solution possibles aux irrégularités de	
41	la conception en plan	58
42	Fig. 63 : Qualité des matériaux et de la mise en œuvre aux niveaux des tronçons partiellement effondrés de la	
43	muraille	59
44	Fig. 64 : Organigramme général de l'assistance technique et architecturale	68
45		

1
2
3
4
5
6
7
8

Liste des tableaux

Tab. 1 : Listes des sites-douars dont proviennent les images et photos 19

Tab. 2 : Synthèse globale concernant le respect des règles et principes de la construction parasismique..... 64

Tab. 3 : Facteurs de vulnérabilité sismique des différents types de constructions 65

Tab. 4 : Proposition d'un phasage de l'opération de la reconstruction 67

Tab. 5 : Liste des points de contrôle des travaux de construction en matériaux locaux..... 69

1. INTRODUCTION GENERALE

Ce document est un rapport technique présentant les résultats d'une enquête de terrain sur l'état de conservation des structures porteuses des constructions dans les régions impactées par le séisme du Haut-Atlas^a du 8 septembre 2023. Il comporte trois principales sections : la première présente la méthodologie adoptée pour la réalisation de l'enquête, la deuxième expose et analyse les résultats de l'enquête réalisée. Quant à la troisième section, elle est consacrée aux conclusions et aux recommandations.

La présente section est une introduction générale ayant pour but de contextualiser le travail réalisé en précisant les objectifs de l'enquête, et en présentant quelques données d'ordre général relatives au séisme concerné et à la région impactée.

1.1. Contexte général et objectifs

Le séisme du Haut-Atlas a eu lieu le 8 septembre 2023. Quelques jours après, le 14 septembre 2023, Sa Majesté le Roi, que Dieu L'assiste, a présidé une réunion de travail consacrée à l'activation d'un programme d'urgence pour le relogement des sinistrés et la prise en charge des catégories les plus affectées par le Séisme^b. Suite à cette réunion, un communiqué du Cabinet Royal a été publié.

Extraits du Communiqué du Cabinet Royal :

« [...] Le Souverain a attiré l'attention des autorités compétentes sur le caractère extrêmement prioritaire de l'opération de relogement, qui doit s'effectuer dans les conditions nécessaires d'équité et d'écoute permanente des besoins des populations concernées. [...]

Aussi, Sa Majesté le Roi a insisté sur la nécessité que l'opération de reconstruction soit menée sur la base d'un cahier des charges et sous une supervision technique et architecturale en harmonie avec le patrimoine de la région et qui respecte ses caractéristiques architecturales uniques. [...] ».

Rabat, le 14 septembre 2023

Afin de contribuer à l'élaboration du Cahier de Charges demandé, le Ministère^c de l'Aménagement du Territoire National, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Politique de la Ville a initié un travail de consultation d'experts et de spécialistes de la construction en matériaux locaux et de la construction parasismique de manière générale.

Dans ce cadre, il a été décidé de mener une enquête post-séisme de terrain afin de recueillir des données fiables. Ces données ont été traitées et analysées en interne au sein de la Direction de la Qualité et des Affaires Techniques du Ministère avant d'être partagées et discutées avec les institutionnels, les professionnels et la société civile. Ainsi, sur la base des résultats de ce travail, le Cahier de Charges en question sera établi conformément aux directives royales en partant des réalités du terrain.

^a Le "séisme du Haut-Atlas" est la dénomination retenue pour désigner le séisme qu'a connu le Maroc le 8 septembre 2023, au lieu du "séisme d'Al Haouz" étant donné que les régions impactées ne concernent pas uniquement la province d'Al Haouz et sachant que "Al Haouz" est à l'origine un nom utilisé pour désigner la plaine des environs de Marrakech dont le chef-lieu est Tahanaout.

^b Pour faciliter la rédaction de ce rapport, le séisme du Haut-Atlas du 8 septembre 2023 sera parfois désigné simplement par le terme "Séisme".

^c Pour faciliter la rédaction de ce rapport, le ministère de l'aménagement du territoire national, de l'urbanisme, de l'habitat et de la politique de la ville sera parfois désigné par le "Ministère ATNUHPV", ou simplement par le terme "Ministère".

Le présent rapport présente l'essentiel des résultats de cette enquête en ce qui concerne les constructions en matériaux locaux.

Le Cahier de Charges à établir, et qui sera mis à la disposition des populations et professionnels concernés, constituera un référentiel technique spécifique à la reconstruction, restauration et réhabilitation des constructions dans les régions impactées par le Séisme.

1.2. Le séisme du 8 septembre 2023

D'après l'Institut National de Géophysique (Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique), le séisme survenu le 8 septembre 2023 au Haut-Atlas marocain, à 23H 11' 01" heure locale (UTC+1) est d'une magnitude de 7.0 à 7.2 (mwp). L'épicentre du séisme, de coordonnées géographiques (30.9896 N ; 8.4140 W), se trouve dans la commune rurale d'Ighil, province d'Al Haouz, région de Marrakech-Safi. Son hypocentre est calculé à une profondeur de 10.7 à 24 km selon les méthodes de détermination appliquées.

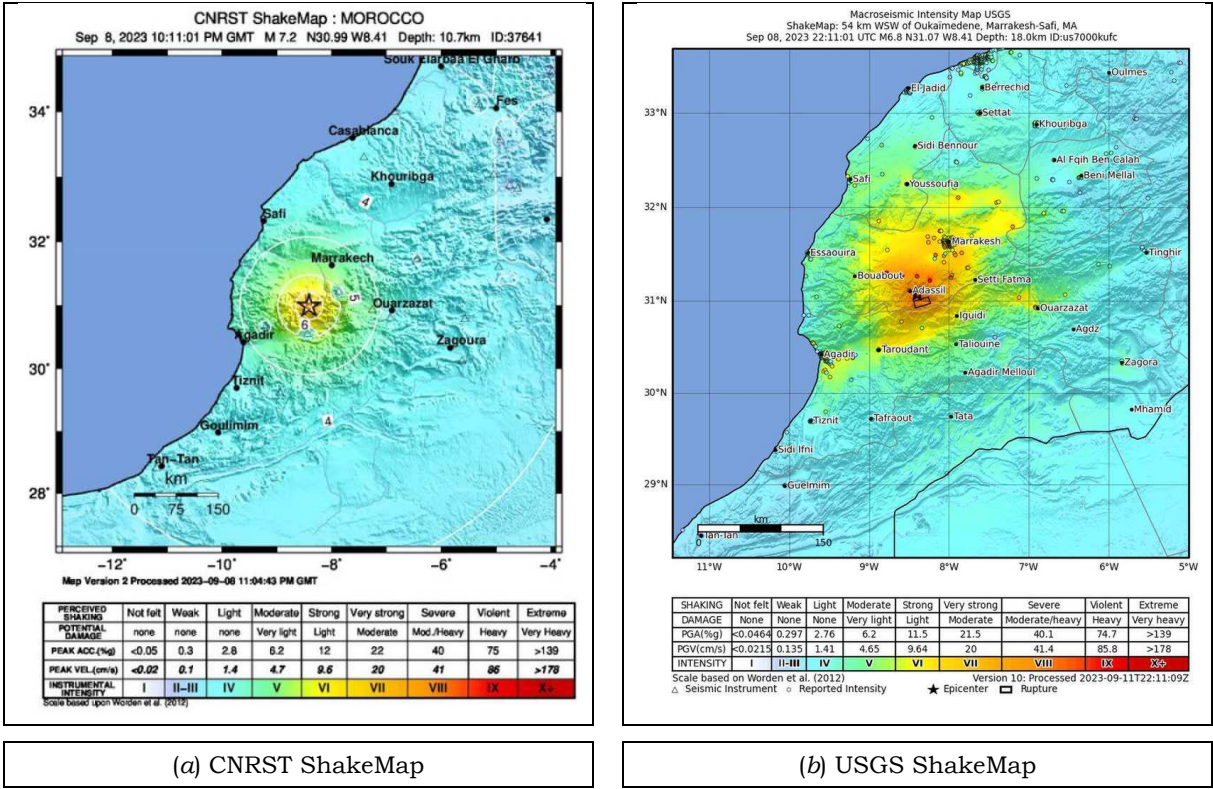


Fig. 1 ShakeMap du séisme du Haut-Atlas du 8 septembre 2023

A noter que ces données diffèrent légèrement de celles communiquées par certains organismes internationaux tels que le USGS [United States Geological Survey] et le EMSC [Euro-Mediterranean Seismological Centre] (Cf. Fig. 1). Les données utilisées dans ce rapport sont celles fournies par l'institution nationale marocaine (ING).

1.3. Les régions impactées

Comme le montre la ShakeMap (Cf. §1.2.), le territoire impacté par le Séisme concerne principalement cinq provinces (par ordre alphabétique) : Al Haouz, Azilal, Chichaoua, Marrakech, Ouarzazate et Taroudant. Rappelons que l'intensité d'un séisme et ses dégâts varient d'un site à un autre selon la magnitude, la distance et la profondeur du séisme, le type de sol et de la vulnérabilité des constructions (Cf. Fig. 2).

Rappelons également que ce premier Séisme a été suivi une vingtaine de minutes plus tard d'une importante réplique de magnitude d'environ 5 (*mwp*). Le bilan provisoire publié le 27 septembre par le ministère de l'Intérieur fait état de 2 960 morts et 5 674 blessés, la majorité des victimes sont recensées principalement dans les provinces d'Al Haouz et de Taroudant.

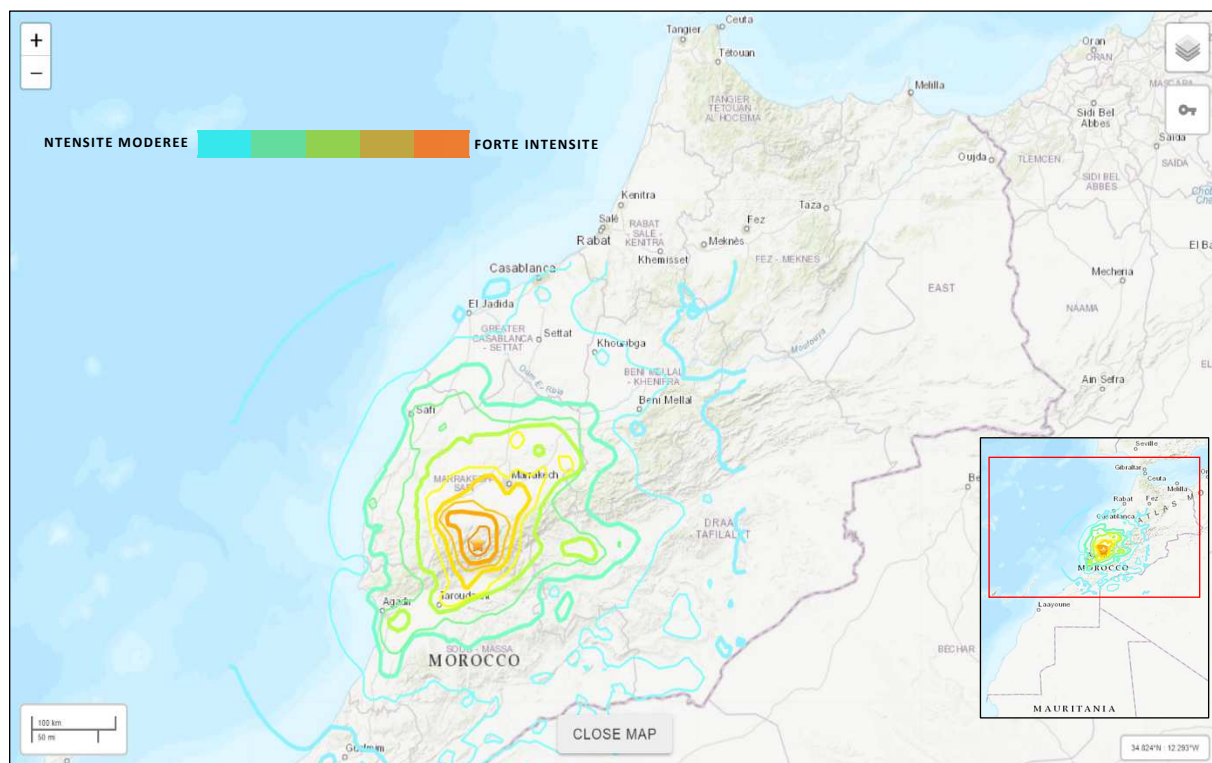


Fig. 2 : Intensité du séisme ressentie selon l'échelle de Mercalli (d'après USGS)

1.4. Un peu d'Histoire

Il est vrai de dire qu'il est nécessaire et primordial de faire le déplacement pour réaliser un état des lieux et une enquête de terrain post-séisme afin de relever des données fiables en vue de dresser des recommandations adaptées. Cependant, cette interrogation des lieux doit être également l'occasion pour interroger également l'Histoire. D'où l'intérêt de ce paragraphe.

1.4.1. "Adrar Ndern"

La zone qui est la plus impactée par le Séisme est la région montagneuse du Haut-Atlas occidental, dont le nom historique qu'on retrouve dans les références de l'Histoire, et qui est toujours utilisé localement, est "Adrar Ndern" [ⵝⵔⵓⵏ ⵏ ⵏⵓⵔⵓⵏ] qui signifie en langue amazighe locale la « montagne qui mugit » ou la « montagne qui gronde ». Un séisme n'est-il pas une sorte de grondement et de mugissement ? La région a-t-elle connue des séismes aussi puissants dans son passé lointain ?

Dans tous les cas, ces questions ont tout le mérite d'être posées. Car, à en croire les populations interrogées et qui ont survécu, pendant les minutes qui ont suivi le tremblement de terre, on entendait un bruit sourd et prolongé venant de la montagne suite aux multiples éboulements et chutes de blocs causés par le Séisme.

Dans certaines références de l'Histoire on retrouve le nom "Adrar n'Draren" dont la traduction littérale est "la montagne des montagnes". Cependant, cette dénomination

n'est pas celle utilisée par les locaux, même aujourd'hui, ni celle qu'on retrouve dans les références anciennes en arabe [ادرار ندرن].

Dans le cadre de cette interrogation de l'histoire, il est utile de rapporter ici qu'ils existent dans la région certaines traces qui ont tendance à confirmer cette hypothèse selon laquelle la région a connu des séismes similaires dans son passé.

Les images-photos ci-après (Cf. Fig. 3), par exemple, montrent des ruines de construction sur un micro-plateau rocheux incliné. Soit un site à effet topographique important pouvant conduire à l'effondrement total des constructions en maçonnerie traditionnelle non renforcée même en cas de séisme modéré.

Il est également intéressant de constater que les bâtiments construits très récemment ou en cours de constructions n'ont pas été implantés à sur le plateau, mais à proximité. Les populations locales sont-elles conscientes du danger ? Ces ruines sont-elles une sorte d'indice permettant aux habitants de la région d'identifier les lieux "maudits" par la nature et donc de les éviter ?



Fig. 3 : Exemple de site montrant des ruines abandonnées d'anciennes constructions (Douar Tassila, Ighil, Al Haouz)

1.4.2. Patrimoine architectural

La région du Haut-Atlas occidental est connue par son style architectural avec des constructions principalement en matériaux locaux (maçonnerie de pierre, pisé, adobe) qui sont souvent à plusieurs niveaux.

Dans les zones à forte pente, ces constructions sont implantées en gradin de manière à épouser la morphologie du terrain naturel. Sur plaine, la construction se fait moins dans la hauteur en optant pour des formes plus étendues horizontalement avec des cours centrées et de superficies relativement importantes.

Parmi les communes rurales les plus impactées par le Séisme, figure celle de Talat n'Yaacoub^d [ⵝⵓⵏⵉⵏⵉⵢⵓⵏ ⵏ ⵢⵉⵏⵉⵏⵉⵢⵓⵏ]. Dans le territoire de cette commune, on retrouve le site historique de Tinmel^e [ⵝⵓⵏⵉⵏⵉⵢⵓⵏ ⵏ ⵢⵉⵏⵉⵏⵉⵢⵓⵏ]. Il s'agit d'un édifice très ancien qui date au moins du début du 12^{ème} siècle. Tinmel était le lieu où le fondateur du mouvement almohades Ibn-Toumert, ses compagnons et fidèles se basaient entre 1121 et 1147, avant la prise de Marrakech, qui était la capitale du pouvoir central en place (les almoravides).

Si cette histoire permet de dire que les locaux de l'époque étaient les constructeurs de Tinmel, il est vrai aussi que l'identité architecturale marocaine connue par tous, dont témoigne le patrimoine national et régional, date de la même époque. En effet, en plus de Tinmel, de très célèbres monuments marocains ont été construits à l'époque des almohades. Parmi ces monuments architecturaux, on peut citer la grande mosquée Koutoubia à Marrakech (1158-1195), l'ancien minaret (la Giralda) de la grande mosquée de Séville (1184-1198), etc. On peut également citer la tour Hassan de Rabat dont les travaux de construction ont commencé vers 1196, mais furent abandonnés après la mort du sultan almohade Yaacoub El Mansour en 1199. Le même Yaacoub dont fait référence "Talat n'Yaacoub" ?

Ce qui est un fait, c'est que sa grande mosquée de Rabat avec son minaret incomplet (tour Hassan) a été détruite par un autre séisme, le célèbre séisme de Lisbonne de 1755. Et quelques soient les réponses à ces questions, une chose est sûre : les marocains de l'Atlas, la construction et les séismes, c'est une vieille histoire, et l'Histoire ne se répète pas, c'est vrai, mais elle bégaye tout le temps.

1.5. Définitions

• Construction en matériaux locaux :

Sont considérés comme matériaux locaux les matériaux de construction à base de terre crue, la pierre naturelle, le bois massif, les fibres végétales et la chaux traditionnelle. Deux types de constructions en matériaux locaux sont à distinguer :

- Les constructions en terre : ce sont les constructions dont la structure porteuse est constituée principalement d'ouvrages en matériaux à base de terre (murs en pisé, adobes, briques de terre comprimée, etc.).
- Les constructions en pierre : ce sont les constructions dont la structure porteuse est constituée principalement d'ouvrages en maçonnerie de pierre avec mortier de jointement à base de terre.

Les constructions en matériaux locaux peuvent contenir des ouvrages en béton (de ciment) armé tels que les linteaux et les éléments de chaînage, à condition que le plancher soit de type traditionnel de structure en bois.

• Construction en matériaux conventionnels :

Sont considérés comme constructions en matériaux conventionnels les constructions en matériaux à base de ciment et/ou d'acier. Il s'agit essentiellement des constructions en

^d "Talat" est un terme de la langue amazighe locale utilisé pour désigner un petit bassin versant hydrologique (début du talweg) marquant la source d'un petit cours d'eau qui peut être permanent ou non, affluent d'un important cours d'eau. "Talat n'Yaacoub" (Talat de Yaacoub) correspond au bassin versant d'un affluent d'oued n'Fis (ⵏⵉⵏⵉⵢⵓⵏ ⵏ ⵢⵉⵏⵉⵏⵉⵢⵓⵏ : Oued d'hyène).

^e "Tinmel" signifie en langue amazighe locale école ou lieu d'apprentissage ou de formation.

1 béton armé et en maçonnerie d'agglos de béton ou de briques de terre cuite. Le terme
2 « *matériaux industriels conventionnels* » est parfois utilisé pour désigner ces matériaux.

3 • **Site et douar :**

4 Dans ce rapport, le terme « site-douar » est utilisé pour désigner un site de construction,
5 qu'il s'agisse d'un groupement d'habitats de type douar ou d'un autre type de
6 construction telles que les constructions à caractère patrimonial. Le terme « site » est
7 généralement utilisé pour désigner l'ensemble de l'environnement des constructions
8 diagnostiquées, y compris les zones environnantes non construites.

9 • **Plancher et toiture :**

10 Dans ce rapport, le terme « plancher-toiture » est utilisé de manière générale pour
11 désigner la structure d'un plancher de construction en matériaux locaux, qu'il s'agisse
12 de plancher intermédiaire entre deux niveaux ou de toiture.

13

2. METHODOLOGIE ET DEROULEMENT DE L'ENQUETE

Cette section présente l'ensemble des principes et critères qui ont été considérés pour le choix des sites visités et la constitution de l'échantillon des constructions diagnostiquées, ainsi qu'une description sommaire des méthodes et moyens utilisés pour la réalisation de l'enquête.

2.1. Echantillon des constructions diagnostiquées

Etant donné le délai très court, il n'a pas été possible de visiter l'ensemble du territoire impacté par le Séisme. Par conséquent, il a été décidé de ne cibler que quelques sites tout en veillant à ce que les constructions diagnostiquées puissent former un échantillon plus ou moins représentatif de l'ensemble des situations. Les critères considérés pour tenter de constituer cet échantillon représentatif sont les suivants :

- La distance du site par rapport à l'épicentre du séisme ;
- Le milieu de construction : (péri)urbain, rural ;
- Le matériau et la technique de construction :
 - En terre : pisé, adobe, etc.
 - En pierre : maçonnerie de pierre avec mortier à base de terre.
 - Planchers de structure en bois massif.
 - Matériaux conventionnels.
- L'âge de la construction : (très) ancienne, relativement récente, très récente.
- L'assistance technique : bâtiments auto-construits sans conception préalable et sans assistance technique, bâtiments construits avec assistance technique de l'architecte et de l'ingénieur spécialisé.
- Le type de construction : construction à caractère patrimonial, bâtiment d'équipement public, construction à usage d'habitation.
- Les caractéristiques du site de construction : topographie, stabilité du terrain, type du sol support des fondations, etc.

Notons qu'en plus de ces critères, un certain nombre de contraintes et de difficultés ont conditionné le choix de certains sites. Parmi ces contraintes on cite : le caractère urgent de l'enquête, l'inaccessibilité de certains sites et la présence d'autres équipes de travail sur le terrain dans le cadre d'autres missions qui peut rendre les conditions de travail parfois difficiles.

2.2. Sites-douars visités

Tenant compte de la représentativité de l'échantillon de constructions recherchée et des contraintes présentées précédemment, et afin de recueillir un maximum de données possible dans le délai imparti, il a été décidé de s'organiser en deux équipes :

- **Equipe 1** : équipe composée d'experts et de spécialistes mobilisés par la Direction de la Qualité et des Affaires Techniques (DQAT) du Ministère. Cette première équipe a pour rôle de faire des diagnostics post-sismiques focalisés sur les dégâts et dommages structuraux des constructions.

- **Equipe 2** : composée de professionnels et de chercheurs et membres de l'association LABINA (Marrakech). Cette deuxième équipe a pour mission de collecter un maximum d'informations et de photos concernant l'état de conservation des constructions après le Séisme, surtout dans les zones et les sites qui n'ont pas pu être visités par l'Equipe (1) (Cf. Fig. 5).



Fig. 4 : Trajet principal suivi par l'Equipe (1)

Les sites visités par l'Equipe (1) sont principalement ceux situés sur la route nationale N7 reliant Marrakech à Taroudant (anciennes R109 et R203), ainsi que les sites sur la route locale reliant la N7 au centre de la commune Ighil, à une dizaine de kilomètres de l'épicentre du Séisme (Cf. Fig. 4).

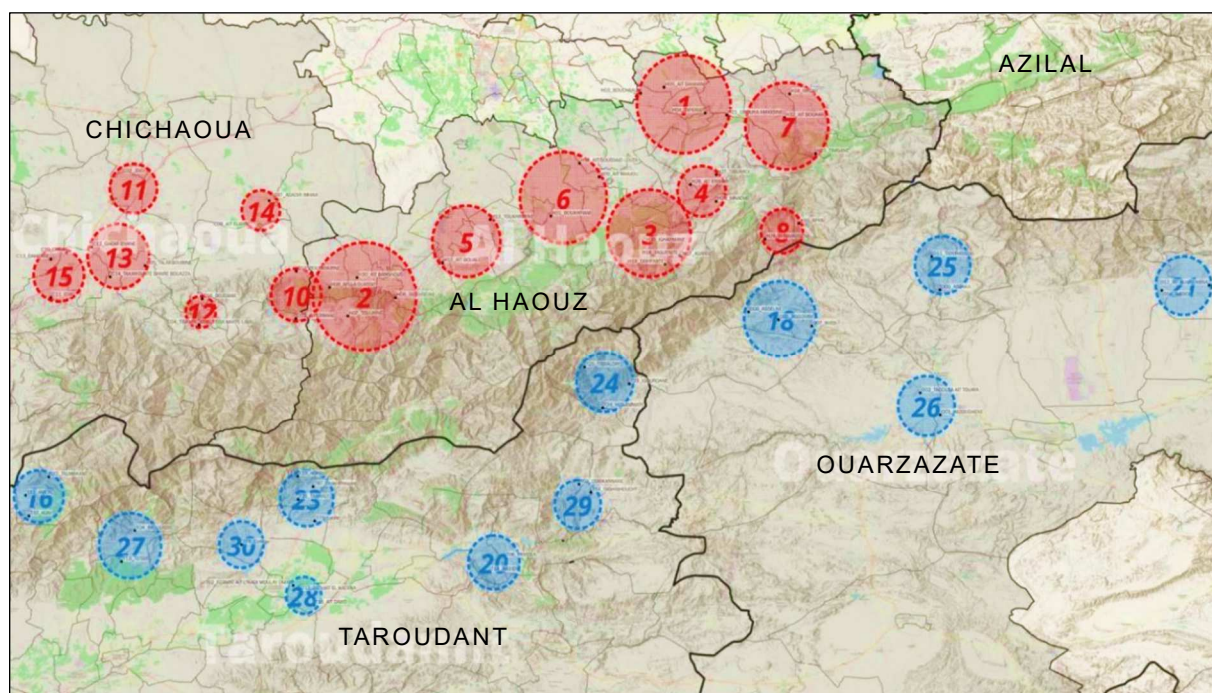


Fig. 5 : Localisation des douars et sites visités par l'Equipe (2)

Par ailleurs, d'autres personnes qui se sont déplacés sur le terrain dans le cadre d'autres missions supervisées par d'autres organismes publics et organisations professionnelles, ont pu apporter leur contribution à ce travail collectif de collecte de données en envoyant leurs documents à la DQAT du Ministère.

2.3. Moyens et documents utilisés

Sont utilisés comme références pour la réalisation de ce travail, les documents techniques en relation avec le sujet de la construction parasismique en matériaux locaux, les documents d'informations générales disponibles concernant les régions impactées, y compris les documents et communiqués publiés par les institutions et les organismes nationaux et internationaux à l'occasion du Séisme, ainsi que certaines images et données diffusées par les médias. Ces références sont citées dans ce rapport aux paragraphes concernés.

À noter qu'il a été également pris en considération dans ce rapport les avis d'experts et de professionnels exprimés lors de la journée organisée par le Ministère le 05 octobre 2023, et qui est consacrée à la présentation et discussion des pathologies des constructions causées par le Séisme.

2.3.1. Visite de terrain et examen visuel des constructions

Les visites de terrain par les personnes chargées du diagnostic sont primordiales. Les photos fournies par des personnes tierces ne suffisent pas pour faire une analyse fiable. En effet, le fait de se déplacer permet de prendre des photos avec des angles de vue adéquats, et permet également de faire des examens visuels directement sur place, chose qu'on ne peut pas faire uniquement sur la base de photos fournies même avec des fiches de diagnostic remplies sur place.

2.3.2. Fiche de diagnostic post-sismique

Les fiches de diagnostic doivent en principe être remplies par des personnes qualifiées. Si l'utilisation de fiches unifiées facilitent l'exploitation des données recueillies, il est plus convenable que ces fiches soient adaptées à la qualification de l'utilisateur. Dans ce sens, une fiche de trois pages a été établie de manière à permettre de renseigner tous types d'informations allant de la description de l'environnement du site à la description des pathologies structurales des constructions diagnostiquées. L'utilisateur de la fiche se contente de remplir les informations disponibles, celles qu'il maîtrise, ou tout simplement celles qui l'intéressent.

Cependant, force est de constater que l'utilisation de fiche aussi longue n'est pas très pratique dans les situations caractérisées par l'urgence. Dans le cadre de sa mission, l'Equipe (1) a mis au point une fiche alternative concise et focalisée sur les objectifs de sa mission, c'est-à-dire l'état des lieux des sites-douars impactés par le Séisme, et le diagnostic des pathologies structurales des constructions en matériaux locaux (Cf. Annexe A).

2.3.3. Images et photographie

Les images et photos utilisées pour réaliser le diagnostic objet du présent rapport sont :

- Les images-satellites de certains sites-douars avant et après le Séisme :
Ces images sont aussi utilisées pour étudier l'évolution de la construction dans le temps pour chaque site. Cela permet, de distinguer les constructions très récentes de celles anciennes et d'étudier l'évolution des techniques et matériaux de construction.

- Les photos prises directement sur site par les membres des deux équipes :
Ces photos sont prises en considérant trois niveaux de diagnostic : à l'échelle d'un site-douar (vue panoramique), à l'échelle d'une construction (photos généralement prises de l'extérieur), à l'échelle d'un ouvrage d'une construction donnée (ouvrage de structure, mais pas uniquement) (Cf. Fig. 6).
- Certaines photos envoyées par des bénévoles qui se sont déplacés sur terrain dans le cadre d'autres missions ;
- Certaines photos et images-vidéo partagées par les Médias locaux immédiatement après le Séisme.

Ces dernières images sont d'une utilité importante pour certains sites, car elles permettent de décrire l'ampleur des dégâts avant que des personnes interviennent et modifient l'état des lieux.

2.4. Niveaux du diagnostic

L'enquête post-séisme objet du présent rapport vise trois niveaux de diagnostic : à l'échelle d'un site-douar de construction, à l'échelle d'une construction et à l'échelle d'un ouvrage d'une construction (Cf. Fig. 6).



Fig. 6 : Exemples de photos illustrant les trois niveaux de diagnostic

2.4.3. A l'échelle d'un site-douar de construction

Le premier niveau de diagnostic concerne le site de construction et son environnement. Le but est de caractériser, de manière grossière, topographiquement et géotechniquement le site-douar concerné, repérer les facteurs pouvant amplifier les dégâts sur les structures des constructions, tels que l'effet topographique (crête de relief, forte pente, etc.), l'instabilité des pentes (glissement de terrain, éboulement, etc.), etc. A cette échelle de diagnostic, il s'agit aussi de dresser un constat global sur l'ampleur des dégâts en estimant le taux des constructions qui sont entièrement effondrées.

2.4.1. A l'échelle d'une construction

Au deuxième niveau, des diagnostics sont réalisés à l'échelle de certaines constructions qui ne sont pas entièrement effondrées. Le but est d'étudier l'ampleur et la nature des dommages que les constructions ont subis (Cf. Fig. 7). Une attention particulière est accordée aux ouvrages de structure, et aux endroits de concentration des contraintes, notamment au niveau des ouvertures dans les murs, au niveau des jonctions des murs et au niveau des liaisons murs-planchers.

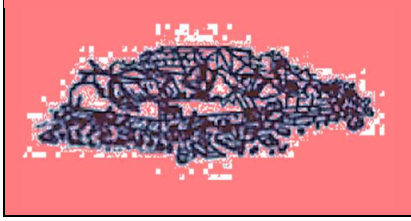
	Degré 1 : Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux). Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris.
	Degré 2 : Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés). Fissures dans de nombreux murs. Chute de grands morceaux de plâtre.
	Degré 3 : Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants). Fissures importantes dans la plupart des murs.
	Degré 4 : Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants). Défaillance sérieuse des murs ; défaillance structurale partielle des toits et des planchers.
	Degré 5 : Destruction totale (dégâts structuraux très importants) Effondrement total ou presque total.

Fig. 7 : Différents degrés de dégâts causés par un séisme sur une construction

2.4.2. A l'échelle d'un ouvrage de construction

Au troisième niveau du diagnostic, des "zooms" sont effectués sur certains ouvrages tels que les murs porteurs, les éléments de contreventement, la structure du plancher-toiture, les éléments de chaînage, etc. Le but est d'évaluer l'impact de l'action sismique sur ces ouvrages de structure importants.

2.5. Données toponymiques

Il est parfois utile de s'intéresser aux noms des lieux en étudiant leur étymologie, dans la mesure où cela peut apporter des informations supplémentaires concernant le site avant même de se déplacer pour effectuer une visite.

Par exemple, le terme "Igudi" (ⵉⵖⵓⵉⵢ) signifie en langue amazighe locale « sables » ou « sédiments » de manière générale. Ainsi, on a une certaine idée sur la nature des sols dans la commune qui porte le nom de "Igudi" (province de Taroudant) sans l'avoir visitée.

2.6. Phases et déroulement du diagnostic

Le diagnostic post-sismique des sites-douars et des constructions des zones impactées par le Séisme s'est déroulé en quatre phases principales :

- **Phase préliminaire :**

Il s'agit de constituer l'équipe de travail, de définir clairement les objectifs du diagnostic à réaliser, élaborer les fiches de diagnostic, s'informer sur le territoire en vue d'optimiser et de programmer les sorties de terrain.

- **Phase de recueil de données :**

Phase où les enquêteurs font les déplacements sur le terrain, collectent les informations et les documents techniques disponibles sur la région impactée par le Séisme.

- **Phase de traitement et préanalyse :**

Des réunions de travail, supervisées par la DQAT du Ministère, ont été organisées pendant et après les visites de terrain pour traiter et examiner les données et résultats obtenus en vue de les présenter devants les différents acteurs publics et privés concernés par la reconstruction des régions impactées.

- **Phase de partage et de discussion :**

Dans cette phase, l'analyse préliminaire réalisée dans la phase précédente a été communiquée. Ce travail de partage et de discussion a été réalisé dans le cadre d'une journée d'étude à laquelle ont été invités les différents organismes nationaux et associations de professionnels et de chercheurs concernés par l'activité sismique et la construction en matériaux locaux.

- **Phase de formulation de recommandations :**

Compte tenu des résultats de la phase précédente, des recommandations sont formulées en vue de les prendre en considération lors de la reconstruction de la région concernée. L'ensemble du travail réalisé est résumé et présenté dans un rapport (le présent rapport).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Au total, une cinquantaine de sites ont été visités. Au niveau de certains sites-douars, un minimum de trois constructions ont été diagnostiquées. Ces constructions sont choisies de manière à prendre en compte les différentes situations relatives au site-douar concerné (technique et matériau de construction, âge de la construction, sol d'implantation, etc.).

Sachant que l'ensemble des données (fiches diagnostic, photos, etc.) recueillies ont été exploitées pendant la phase d'analyse, il n'a pas été possible, ni nécessaire de les présenter dans ce rapport. En effet, les exemples inclus dans ce rapport le sont à titre d'illustration. Les autres cas de sites et de constructions diagnostiquées et analysées conduisent aux mêmes résultats qui sont présentés et discutés dans la présente section.

Les images et photos (prises entre le 18 et le 24 septembre 2023) présentées et commentées dans cette section concernent les sites-douars ci-dessous (Cf. Tab. 1). Les distances par rapport à l'épicentre du Séisme sont arrondies au 5 km près.

Tab. 1 : Listes des sites-douars dont proviennent les images et photos

Site (Douar)	Commune et Province	Coordonnées	Distance épicentre
Amerzagane	Ighil, Al Haouz	30.973903, -8.279021	10 km
Afella Nouzgrouz	Iguidi, Taroudant	30.859956, -8.021615	40 km
Agadir Oufella	Agadir Ida Outanane	30.430073, -9.625096	125 km
Aghllade	Iguidi, Taroudant	30.826472, -7.908681	45 km
Ait Oublal	Tizi n'Tast, Taroudant	30.826948, -8.423429	15 km
Ait Tiyouga	Tizi n'Tast, Taroudant	30.850776, -8.393250	15 km
Alggo	Tizi n'Tast, Taroudant	30.839112, -8.404777	15 km
Amchekarjen	Ighil, Al Haouz	30.981057, -8.302789	10 km
Asselda	Asni, Al Haouz	31.255644, -7.965851	50 km
Assif El Mal	Assif El Mal, Chichaoua	31.309665, -8.479529	40 km
Ifouriren	Talat n'Yaacoub, Al Haouz	30.971150, -8.241059	15 km
Ighfis	Tizi n'Tast, Taroudant	30.844618, -8.394658	15 km
Ighil Centre	Ighil, Al Haouz	30.983397, -8.288220	10 km
Imgdal	Imgdal, Al Haouz	31.123795, -8.119769	30 km
Imerchichen	Imi n'Dounit, Chichaoua	31.056417, -8.477964	10 km
Izarran	Ighil, Al Haouz	30.973876, -8.278956	10 km
Lbared	Tahannaout, Al Haouz	31.387026, -7.946016	60 km
Ouirizen	Tahannaout, Al Haouz	31.342897, -7.927403	60 km
Tajgalt	Tafingoult, Taroudant	30.792379, -8.382376	25 km
Talat n'Yaacoub	Talat n'Yaacoub, Al Haouz	30.990419, -8.184721	25 km
Tamsoult	Tizi n'Tast, Taroudant	30.844610, -8.390048	15 km
Tassila	Ighil, Al Haouz	30.974571, -8.267355	10 km
Tinmel	Talat n'Yaacoub, Al Haouz	30.984630, -8.228271	20 km

3.1. Constats globaux à l'échelle de la région étudiée

Avant de présenter les résultats du diagnostic réalisé, certains constats globaux sont à noter, notamment en ce qui concerne les matériaux de construction et la morphologie des sites de constructions.

3.1.1. Techniques et matériaux de construction

3.1.1.1. Construction en matériaux locaux

De manière assez générale, et mis à part quelques exceptions, il est vrai de dire que les matériaux de construction utilisés dans la région du Haut-Atlas sont globalement ceux qui sont disponibles sur le site de construction.

Ainsi, la maçonnerie de pierre à mortier de terre est la technique de construction la plus répandue dans les zones montagneuses, surtout dans le versant nord du Haut-Atlas (provinces d'Al Haouz et de Chichaoua), surtout en s'approchant de l'épicentre du Séisme, et ce pour trois raisons principales :

- a. D'abord, la terre n'est pas disponible en quantité suffisante comparée à la pierre.
- b. Ensuite, la pierre disponible localement est une pierre relativement facile à travailler (les éléments de pierre sont généralement de taille moyenne et de forme allongée voire plate).
- c. Enfin, l'accès difficile à certains sites reculés n'encourage et ne facilite pas l'importation de matériaux industriels conventionnels en quantité importante.

De même, les techniques de construction en terre sont les plus répandues dans les plaines, sachant que c'est également le cas même dans les zones montagneuses du versant sud du Haut-Atlas (province de Taroudant) en raison de la non-disponibilité de la pierre en quantité suffisante. A noter que la technique du pisé reste le procédé de construction en terre le plus fréquent comparé à la maçonnerie de blocs de terre (adobes).

Entre ces deux tendances on retrouve des sites où les deux techniques de construction, maçonnerie de pierres et pisé-adobe, coexistent. C'est notamment le cas de la plupart des douars situés entre les plaines d'Al Haouz-Chichaoua et les hautes montagnes.

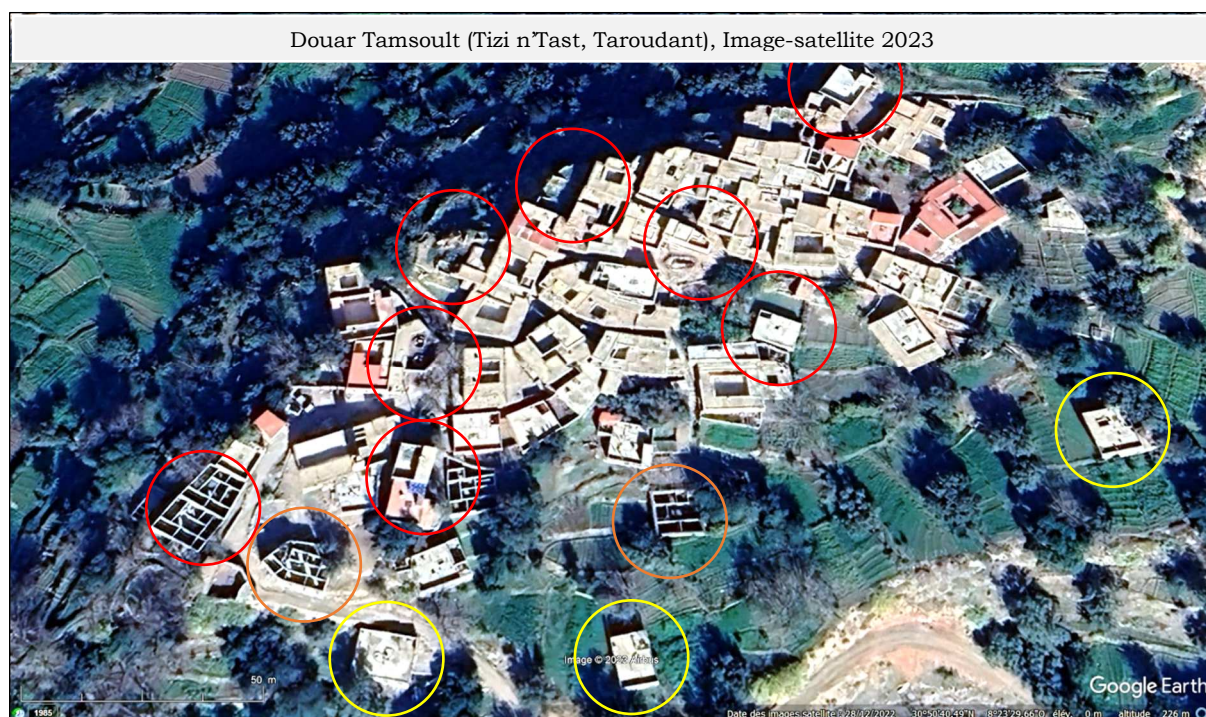
3.1.1.2. Construction en matériaux industriels conventionnels

L'introduction des matériaux de construction industriels conventionnels, de type béton armé de ciment et dérivés, pour la construction des éléments porteurs tels que les murs et les dalles, est relativement récente comme en témoigne les images-satellites. La distinction entre les constructions en matériaux locaux et les constructions en matériaux conventionnels sur ces images est possible, car les constructions en maçonnerie conventionnelle d'agglos de béton sont moins étendues, les épaisseurs des murs sont moins importantes, les terrasses sont accessibles et caractérisées par des murs d'acrotère contrairement aux anciennes constructions en matériaux locaux.

Au douar Tamsoult (Tizi n'Tast, Taroudant) par exemple, cette distinction est assez claire en étudiant l'évolution de la construction sur la dernière décennie (Cf. Fig. 8). Par ailleurs, il faut signaler que dans le cas des constructions à deux niveaux et plus, les murs porteurs du premier niveau sont généralement réalisés en matériaux locaux avant de poursuivre la construction des niveaux suivants en matériaux conventionnels.

Aussi, les bâtiments construits relativement récemment sont souvent implantés de manière isolée des anciens bâtiments si, bien évidemment, la disponibilité du terrain le permet, sinon les nouveaux bâtis sont accolés aux anciens.

1 L'exemple du douar Tamsoult ci-dessous (Cf. Fig. 8), où le terrain constructible se fait
2 rare, montre qu'en effet la plupart des nouvelles constructions ont été implantées en
3 contact avec les anciennes constructions (cercles rouges), avec quelques exceptions de
4 bâtiments isolés et qui ont été construits sur terrain agricole (cercles jaunes).



7 Fig. 8 : Extension de la construction pendant les dizaines dernières années dans les douars où le terrain
8 constructible est rare

9 L'introduction des matériaux de construction conventionnels est une tendance qui n'est
10 pas courante dans les sites-douars dont l'accès est difficile. C'est le cas par exemple du
11 douar Izarran (Ighil, Al Haouz) où la construction en matériaux conventionnels est

1 presque absente (Cf. Fig. 9), sauf pour la réalisation de certains éléments de chaînage et
2 de renforcement.



5 Fig. 9 : Exemple de sites-douars dont la construction n'a pas beaucoup évolué pendant les dizaines dernières
6 années

7 En revanche, dans les sites-douars proches de voies goudronnées, l'introduction de
8 matériaux de constructions conventionnels s'est faite de manière massive et anarchique
9 conduisant ainsi à la défiguration de l'architecture locale. C'est le cas par exemple du
10 douar Asselda (Asni, Al Haouz) où la plupart des étages sont construits sur des rez-de-
11 chaussée en terre (Cf. Fig. 10). Ceci a pour conséquence de créer des bâtiments non
12 monolithiques et fragiles face au Séisme, sans oublier les défauts liés aux mauvaises
13 conceptions et mises en œuvre.



Fig. 10 : Introduction massive et anarchique de matériaux de construction conventionnels (Douar Asselda, Asni, Al Haouz)

3.1.2. Implantation des sites-douars

Dans les régions montagneuses, l'implantation des groupements d'habitats se fait généralement soit en pente dans des sites situés entre les cours d'eau et les hautes altitudes de montagne, soit sur crêtes de reliefs près d'une source d'eau (Cf. Fig. 11).

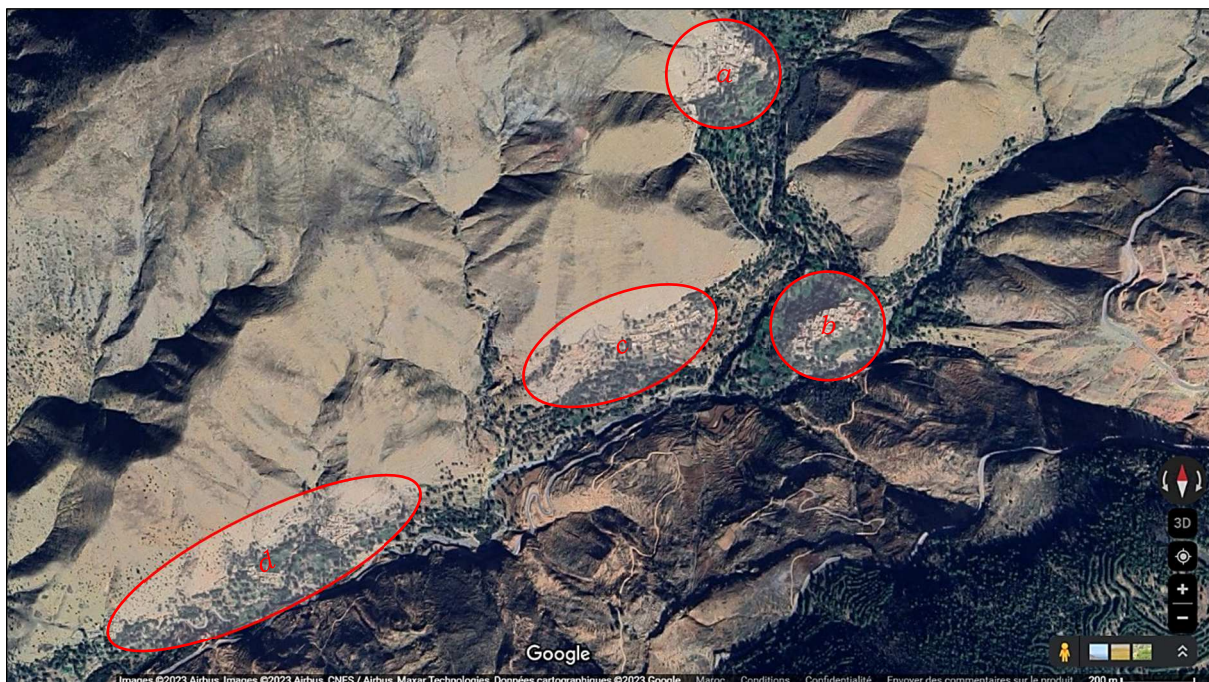


Fig. 11 : Implantation typiques des groupements d'habitat dans les régions du haut-atlas ([a] : douar Ait Tiouga ; [b] : Tamsoult ; [c] : Ighfis ; [d] : Algo, Commune Tizi n'Tast, Taroudant)

Il est à noter que dans ces régions où le terrain est caractérisé par de fortes pentes, les populations disposent de peu d'alternatives quant aux choix des sites de construction.

En effet, les terrains disponibles près des cours d'eau et dont les pentes sont moins importantes, sont aménagés et réservés à l'agriculture maraîchère.

3.2. Diagnostic à l'échelle d'un site-douar

Ce paragraphe est consacré à la présentation des résultats du diagnostic réalisé à l'échelle des sites et de douars visités. Afin d'éviter les répétitions, les illustrations présentées ne concernent pas tous les sites-douars. Les discussions et les commentaires faits autour de ces illustrations ne sont pas de nature à être généralisés. En effet, il faut les contextualiser en prenant en considération les spécificités de chaque site.

3.2.1. Les sites-douars construits sur terrain incliné

Pour les sites-douars implantés sur pentes ou aux crêtes de reliefs, où la disponibilité de terrain constructible est plutôt rare, les constructions sont réalisées de manière groupée (constructions accolées les unes aux autres sans joints créant ainsi beaucoup de murs mitoyens ne permettant pas le libre déplacement des structures afin d'éviter les entrechoquements). L'implantation se fait en gradin de manière à épouser la morphologie du site de construction.

3.2.2. Les sites-douars construits sur terrain horizontal

Les douars implantés sur plaines sont plus ou moins dispersés, et les constructions sont plus étendues en surface. Ceci est spectaculairement visible sur les images-satellites où l'on voit clairement les différentes constructions de superficies importantes implantées de manière isolées les unes des autres, sinon en groupements isolés les uns des autres constitués d'un nombre limité de constructions (Cf. Fig. 12).



Fig. 12 : Exemple de douar implanté sur terrain de faible inclinaison (Douar Ait Oublal, Commune Tizi n'Tast, Taroudant)

3.2.3. Dégâts et effets de sites

Généralement, les premiers bâtiments à être construits dans un site-douar sont implantés sur un terrain qui ne peut pas être exploité pour l'agriculture, c'est-à-dire sur un terrain rocheux.

- 1 Dans le cas où ce rocher est fortement incliné, et dans l'absence de système de
2 soutènement adéquat, l'action sismique entraîne un glissement des constructions
3 provoquant ainsi leur effondrement.
- 4 C'est le cas par exemple ici au Douar Tamsoult^f où la pente avoisine les 35° (Cf. Fig. 13).
5 Toutes les constructions sur cette partie du site sont entièrement effondrées.



6

Fig. 13 : Effondrement total des anciennes constructions en terre réalisées sur pente rocheuse (Douar Tamsoult, Tizi n'Tast, Al Haouz)

^f Tamsoult () signifie en amazighe « plateau ». C'est un terme utilisé aussi pour désigner un écran de télé. On peut donc dire que le site est rocheux caractérisé par une pente régulière de manière à ressembler à un plateau incliné.

- 1 Parmi les erreurs d'implantation constatés sur le terrain lors de l'état des lieux réalisé, le
2 fait que certains groupements de construction soient construits sur des terrains sableux
3 relativement meubles et qui risquent de subir des mouvements importants lors d'un
4 séisme, ce qui peut conduire à une liquéfaction du sol.
- 5 C'est le cas notamment de ce site-douar d'Ait-Oublal (Cf. Fig. 14). Sachant que le Séisme
6 s'est produit pendant la saison sèche et que le sol n'est pas suffisamment humide,
7 l'ampleur des dégâts constatés sur ce site ne peut pas être expliquée uniquement par
8 cette instabilité géotechnique.



9

Fig. 14 : Effondrement total ou presque des anciennes constructions en terre réalisées sur sol relativement meuble (Douar Ait-Oublal, Tizi n'Tast, Al Haouz)

Les constructions en matériaux locaux (maçonnerie de pierre, pisé ou adobe) implantées à la limite d'une terrasse naturelle (petite falaise) ont subi beaucoup de dommages qui ont conduit dans la plupart des cas à l'effondrement total.

C'est le cas par exemple du douar Tajgalt (Tafingoult, Taroudant) où l'on peut voir que la plupart des bâtiments construits loin de ces limites topographiques n'ont pas subi des dommages aussi importants. Certaines de ces constructions n'ont d'ailleurs été que légèrement endommagées (Cf. Fig. 15).



1

Fig. 15 : Effondrement total ou presque des anciennes constructions en terre implantées à la limite de terrasses non stabilisées (Douar Tajgalt, Tafingoult, Taroudant)

Le même constat observé pour les constructions en terre (Cf. Fig. 13) peut être évoqué pour les constructions en maçonnerie de pierre implantées dans les mêmes conditions, c'est-à-dire sur terrain rocheux fortement incliné sans aucun dispositif de stabilisation et d'aménagement relatif aux fondations.

Le site-douar d'Amerzagane (Ighil, Al Haouz) est l'un de ces groupements de constructions en pierre qui correspondent à cette situation. En effet, les bâtiments à proximité mais pas sur le « rocher-écran » ne sont pas entièrement effondrés (Cf. Fig. 16).



1

Fig. 16 : Effondrement total ou presque des anciennes constructions en pierre implantées sur pente rocheuse (Douar Amerzagane, Ighil, Al Haouz)

L'une des façons qui permettent de mettre en évidence les effets de site ci-dessus consiste à prendre des vues globales panoramiques du site concerné ainsi que son environnement, notamment les groupements de constructions voisines. Ici par exemple, sur la même photo, on voit deux sites-douars (Amerzagane et Izarran) et on constate que l'impact du Séisme sur les deux groupements de constructions n'est effectivement pas le même (Cf. Fig. 17).

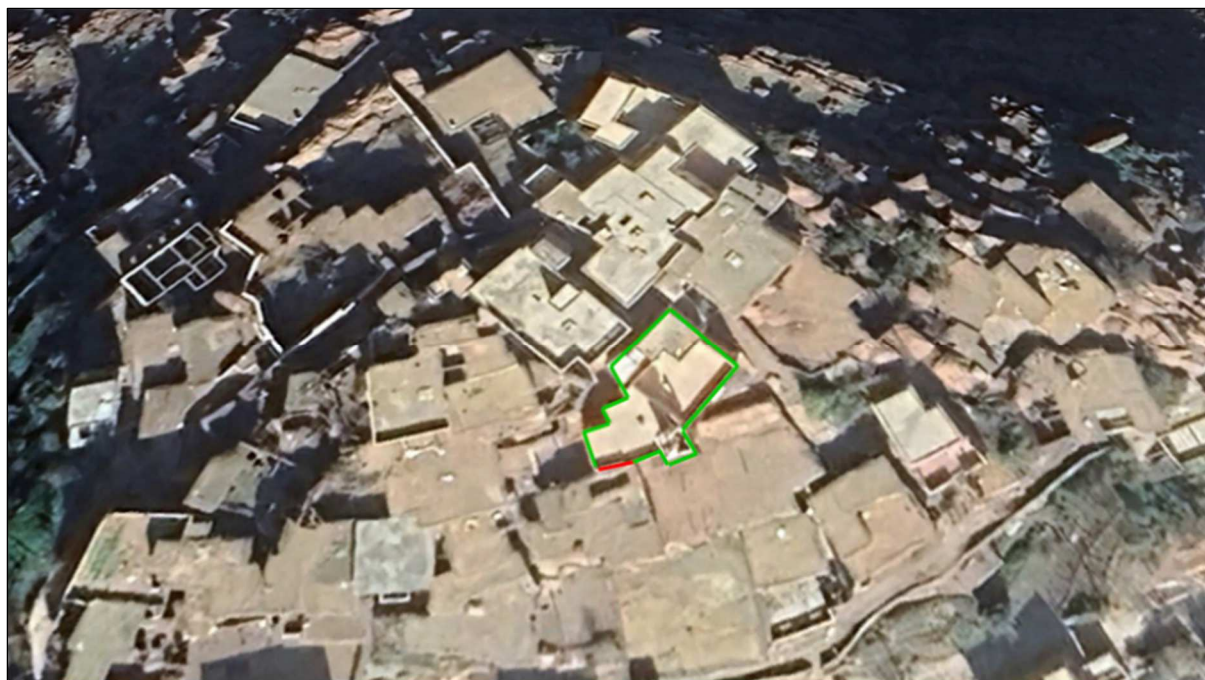
En plus de ce qui a été expliqué précédemment, deux autres facteurs peuvent expliquer cette différence en termes de dégâts. Il s'agit de la géologie (terrains de couleurs différentes) et la densité des constructions (Cf. Fig. 9 et Fig. 18).



Fig. 17 : Effets de site et leurs impacts sur l'ampleur des dégâts constatés sur deux groupements de constructions très proches l'un à l'autre (Douars Amerzagane et Izarran, Ighil, Al Haouz)

Dans les sites-douars dont les constructions sont entièrement effondrées ou presque, les enquêteurs et les observateurs ont pu constater que la plupart des mosquées ont pu résister à l'effondrement total.

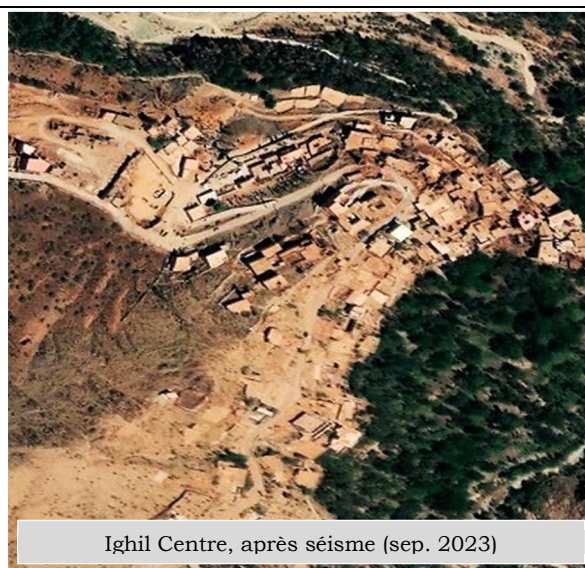
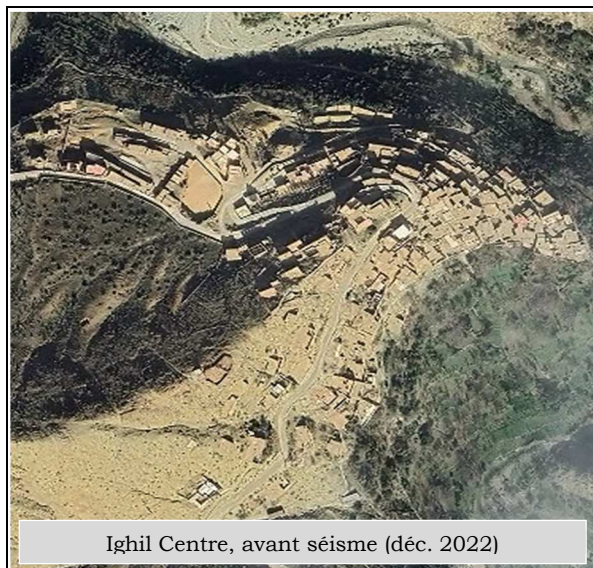
En plus du fait qu'elles soient généralement bien construites et bien entretenues, il faut signaler également que ce sont souvent des constructions « isolées structurellement » du reste des bâtiments. Ici par exemple (Cf. Fig. 18), on peut voir que la partie du mur de la mosquée qui est accolée à une construction voisine (partie indiquée en trait rouge) est la seule partie qui a subi un effondrement. A noter que le premier niveau de cette mosquée est entièrement construit en pierre.



1

Fig. 18 : "L'isolation structurelle" des constructions a eu pour conséquence le fait que la plupart des mosquées ne se sont pas entièrement effondrées (Ici mosquée du douar Amerzagane, Ighil, Al Haouz)

1 Les images-satellites avant et après le Séisme permettent de relever les mêmes constats.



4 Fig. 19 : Images-satellites montrant l'ampleur des dégâts causés par le Séisme sur certains sites-douars

Ainsi, comme on peut le voir ci-après (Cf. Fig. 19), les constructions qui ont été le plus impactées, et qui ont subi un effondrement total sont généralement celles qui sont relativement anciennes (les premières à être construites sur le site), concentrées et accolées les unes aux autres sans « *isolation structurelle* » ou implantées sur pente à la limite des terrasses non soutenues.

A l'inverse, les constructions qui ont le plus résisté à l'effondrement sont celles qui ont été construites relativement récemment de manière isolée du reste des bâtiments, qu'il s'agisse de matériaux de construction locaux ou de matériaux industriels conventionnels.

3.3. Diagnostic à l'échelle d'une construction

3.3.1. Configurations architecturales

Les configurations architecturales en plan répandues dans les régions du Haut-Atlas sont de forme rectangulaire simple. Indépendamment de la technique de construction utilisée, qu'elle s'agisse de maçonnerie de pierre, de pisé ou de maçonnerie de blocs de terre (adobes), deux principales configurations architecturales sont à distinguer :

- **Architecture typique des pentes**

Quand le terrain est d'une forte inclinaison les constructions sont conçues en longueur parallèlement aux courbes de niveau. L'extension se fait généralement en hauteur et peut atteindre parfois trois niveaux. Sinon, quand le terrain le permet, l'extension en plan se fait par bloc rectangulaire implanté en gradin (Cf. Fig. 20).



Fig. 20 : Exemple typique de constructions implantées en gradin (Douar Imerchichen, Commune Imi n'Dounit, Chichaoua)

- **Architecture typique des plaines**

Dans le cas des terrains relativement horizontaux, les constructions sont conçues en forme presque carrée, caractérisées par de grandes cours centrales (⦿⦿⦿X : *assarag*)

(Cf. Fig. 12). Les constructions récentes sont implantées presque systématiquement de façon isolée des anciennes constructions qui, elles, sont groupées au même emplacement.

• Architecture des constructions récentes

Les bâtiments construits récemment suivent en général les configurations architecturales locales, même si les matériaux locaux sont parfois remplacés par le béton armé et la maçonnerie conventionnelle, à l'exception des planchers en béton armé qui sont souvent réalisés de manière à couvrir l'ensemble du bâtiment (Cf. Fig. 21).

Par ailleurs, il est à rappeler que les constructions en matériaux conventionnels sont moins encombrantes en raison de l'épaisseurs des murs qui est faible en comparaison avec les murs en pierre-terre.



Fig. 21 : Evolution de l'architecture régionale suite à l'introduction de matériaux industriels (commune Igudi, Traoudant)

3.3.2. Conditions d'implantation

L'implantation des constructions en matériaux locaux, qu'elles soient en terre (pisé, adobe) ou en maçonnerie de pierre se fait de manière classique par le biais de fondations superficielles en semelles filantes sous les murs porteurs. Ces semelles, qui sont en réalité des simples murs en maçonnerie de pierre, sont prolongées au-dessus du terrain naturel jusqu'à une certaine hauteur formant ainsi le soubassement.

Cependant il est rare que ce soubassement soit couronné par un chaînage. Aussi, la hauteur du soubassement n'est pas toujours constante pour l'ensemble des pièces d'une construction ; le niveau du soubassement est généralement spécifique à chaque pièce du même bâtiment (Cf. Fig. 22).

Dans d'autres cas, la variation du niveau du soubassement est parfois "imposée" par la pente du terrain, et peut varier pour la même pièce pour les murs disposés dans le sens de la pente.



Fig. 22 : Soubassement en maçonnerie de pierre d'une construction en pisé (Douar Aghllade, Iguidi, Taroudant)

Par ailleurs, il est important de noter que dans le cas des constructions implantées sur terrain rocheux, la notion de fondation-semelle enterrée n'existe pas, même dans le cas où le terrain est fortement incliné. En effet, les murs sont directement et simplement posés sur le rocher (Cf. Fig. 23).



Fig. 23 : Exemple de constructions dont les murs porteurs sont simplement posés sur le terrain rocheux sans aucune disposition constructive particulière (Douar Amchrajen, Ighil, Al Haouz)

Dans les sites caractérisés par des inclinaisons fortes, et sur quasiment tous les sites-douars visités, les murs extérieurs des constructions quand ils ne sont pas mitoyens, ils jouent le rôle de mur de soutènement dans la mesure où ils sont soumis à la pression des terres (Cf. Fig. 24). En plus des problèmes liés à l'humidité, cela risque d'impacter la construction en cas de secousse sismique surtout si la pente naturelle n'est pas suffisamment stable, et dans le cas où le mur n'est pas dimensionné en tenant compte de la poussée des terres.

Cette façon d'implanter les constructions dans des terrains en pente peut être acceptée si le site est un rocher stable et difficile à modifier par terrassement. Dans le cas contraire, un déblaiement s'impose et la construction doit être implantée à une distance de sécurité par rapport au talus du déblai.



Fig. 24 : Exemple de mur extérieur exposé aux pressions des terres (douar Aghllade, Igudi, Taroudant)

3.3.3. Conception en élévation

- **Conception et dimensions :**

La structure porteuse en élévation des constructions en matériaux locaux est composée de murs d'une épaisseur de l'ordre de 50 cm dans le cas des murs en terre, et de l'ordre de 40 cm dans le cas des murs en maçonnerie de pierre.

La hauteur des murs par niveau ne dépasse presque jamais 2.50 m, surtout pour le premier niveau (rez-de-chaussée ou rez-de-jardin). Par conséquent, l'élancement des murs (hauteur/épaisseur) reste largement faible, ce qui est une bonne chose pour la stabilité sismique. En ce qui concerne la longueur des murs, elle ne dépasse que rarement les 5 mètres. En effet, les pièces sont généralement conçues avec une largeur de moins de 3 m (largeur d'environ 2.50 m) et une longueur de moins de 5 m, sauf dans le cas des locaux réservés aux bétails (ⴰⵎⵔⵉⵎⵉⵙ : Aghgummi) et la chambre d'invités (ⴰⵎⵓⵔⵉⵎⵉⵙ : Tamsrit) pour lesquels la longueur peut parfois être plus importante.

Les ouvertures dans les murs sont généralement bien réparties et centrées. leur largeur reste limitée : environ 60 cm pour les fenêtres, systématiquement inférieure à 1.00 m

pour les portes, sauf pour la porte d'entrée qui peut atteindre 1.20 m. Les linteaux des ouvertures sont généralement conçus en éléments de bois sous forme de rondins ou d'éléments équivalents. Les appuis des linteaux souvent apparents sont d'une bonne proportion par rapport à la portée (40 cm voire plus).

- **Matériaux et mise en œuvre :**

La qualité des matériaux et de la mise en œuvre des murs varient selon les sites-douars et selon les constructions. Néanmoins, et mis à part certaines exceptions, on peut dire que la qualité de mise en œuvre est fortement liée à celle du matériau de construction utilisé. C'est le cas notamment des murs en maçonnerie de pierre (Cf. Fig. 25).



(a) Exemple 1 (Ijoukak, Al Haouz)



(b) Exemple 2 (Ighil, Al Haouz)

Fig. 25 : Exemple de murs en maçonnerie de pierre où l'on voit l'influence de la forme de la pierre sur la qualité de mise œuvre

- **Chaînage et renforcement**



Fig. 26 : Technique de chaînage en bois massif local (Douar Afella Nouzgrouz, Iguidi, Taroudant)

1 L'utilisation de raidisseurs pour renforcer les murs construits en matériaux locaux est
2 une vieille pratique dans la culture constructive locale. En effet, pour construire plus
3 haut, le bois est souvent utilisé comme moyen de renforcement et de chaînage horizontal,
4 et parfois même pour le chaînage vertical. Cette technique constructive est plus fréquente
5 dans le cas de la maçonnerie en pierre que dans le cas de la construction en terre (Cf.
6 Fig. 26).

7 Pour les constructions relativement récentes, le chaînage est réalisé en utilisant le béton
8 armé. Cependant, ces techniques modernes de renforcement ne sont pas aussi maîtrisées
9 que les techniques utilisant le bois. En effet, l'utilisation du béton armé comme élément
10 de chaînage se fait parfois en suivant la même logique du chaînage en bois, et non pas
11 en respectant rigoureusement les concepts de maçonnerie armée (Cf. Fig. 27).



Fig. 27 : Eléments de renforcement-chaînage en béton armé appliqués sur des murs en maçonnerie traditionnelle de pierre (Douar Amchkrajen, Ighil, Al Haouz)

3.3.4. Structure des planchers-toitures

La structure des planchers-toitures traditionnels est en bois massif. Elle est conçue en trois niveaux : le premier est constitué de poutres (rondins) de diamètre de 15 à 20 cm appuyées sur les murs porteurs, le deuxième niveau est constitué de poutrelles en solives de bois massif de diamètre d'environ 10 cm. Sur ces poutrelles, un branchage, souvent en roseaux, est réalisé formant ainsi le troisième et dernier niveau de la structure (Cf. Fig. 28). Sur cette nappe de branchage, un film plastique servant d'étanchéité est posé avant la mise en œuvre d'une couche de terre imperméable compactée.

La toiture est généralement conçue de manière débordante permettant ainsi de protéger les murs contre les intempéries (Cf. Fig. 27). Sinon, une protection par des pierres plates (Cf. Fig. 25-b) ou par des éléments de dalles en béton (Cf. Fig. 22) est nécessaire pour les mêmes raisons.



Fig. 28 : Effondrement partiel d'une toiture traditionnelle montrant ainsi les détails de sa conception

3.3.5. Habillage et finition

De l'extérieur, les constructions en matériaux locaux (terre ou pierre) sont soit laissées à l'état brut soit protégées par un enduit à base de ciment. Une couche de peinture de couleur abricot est parfois ajoutée (Cf. Fig. 6).



Fig. 29 : Fissurations dues à l'action sismique très visibles grâce à l'enduit de finition

En plus de sa fonction de protection des murs contre l'action de l'eau, l'enduit de finition a l'avantage de permettre de relever facilement les fissures engendrées par le Séisme. Pour l'exemple ci-dessus (Cf. Fig. 29), on peut voir que les fissures dues à l'action sismique sont de type diagonal et plus importants au niveau supérieur des murs sous les planchers-toitures, et aux jonctions des murs au niveau des angles.

3.4. Diagnostic à l'échelle d'un ouvrage élémentaire

Ce paragraphe est réservé à la présentation et à la discussion des dégâts et dommages typiques constatés sur les principaux ouvrages porteurs des constructions en matériaux locaux. Les dommages structuraux sont présentés et décrits à l'aide des photos prises sur place, accompagnés de commentaires sommaires. Ces commentaires sont non exhaustifs et sont à contextualiser par rapport aux caractéristiques des constructions et des sites concernés.

3.4.1. Les fondations et soubassement

Il est difficile voire impossible de diagnostiquer les ouvrages enterrés de fondation des bâtiments avec la méthodologie et les moyens adoptés. Mais, il est possible, et utile dans le cadre des objectifs de cette enquête, de s'intéresser aux ouvrages apparents tels que les murs de fondations et les soubassements.



Il a été relevé que certains bâtiments en terre ne disposent pas de murs de soubassement, et que des murs en terre crue (ici pisé) sont partiellement enterrés sans protection contre l'action de l'humidité. Heureusement que le Séisme s'est produit pendant la saison sèche de l'année, sinon les dégâts seraient beaucoup plus graves.

Fig. 30 : Exemple de bâtiment sans soubassement (Douar Asselda, Asni, Al Haouz)



Sur les terrains rocheux, les murs sont simplement posés sur le rocher sans aucun dispositif de fondation particulier. Cela peut se faire correctement si la pierre utilisée est adaptée (forme plate) comme c'est le cas ici. Sinon, cela risque d'être très dangereux (irrégularité en hauteur) surtout en l'absence de chaînage du soubassement.

Fig. 31 : Exemple de murs implanté sur sol rocheux (Douar Assif Lmal, Chichaoua)

1 Dans les cas des sites rocheux, les fondations ne sont pas enterrées. En réalité, la
 2 construction sur sol rocheux « n'a pas de système de fondation spécifique » ; la largeur
 3 du mur lui-même suffit pour transmettre les contraintes dues aux charges statiques au
 4 sol support.



Quand le terrain est rocheux et ne permet pas le terrassement de manière à implanter les fondations sur sol horizontal, il est recommandé de couronner le mur de fondation par un chaînage avant de se lancer dans la construction des murs porteurs, comme c'est le cas ici (même si l'on peut voir des défauts de continuité du chaînage).

Fig. 32 : Exemple de soubassement réalisé avec chaînage (Ighil centre, Al Haouz)

6 Les références de la construction parasismique recommandent à ce que toutes les
 7 semelles d'une même construction soient implantées au même niveau de manière à
 8 assurer une certaine régularité de la construction en élévation. Sinon, l'implantation des
 9 fondations doit respecter les principes de stabilité des pentes et doivent dans tous les cas
 10 être couronnées par un chaînage de manière à ce que les murs porteurs soient implantés
 11 au même niveau. Aussi, même si la largeur des murs suffit pour assurer la stabilité vis-
 12 à-vis de point de vue de la capacité portante du sol support, il est recommandé de
 13 démarrer la construction par des semelles de largeur supérieure à celle des murs.



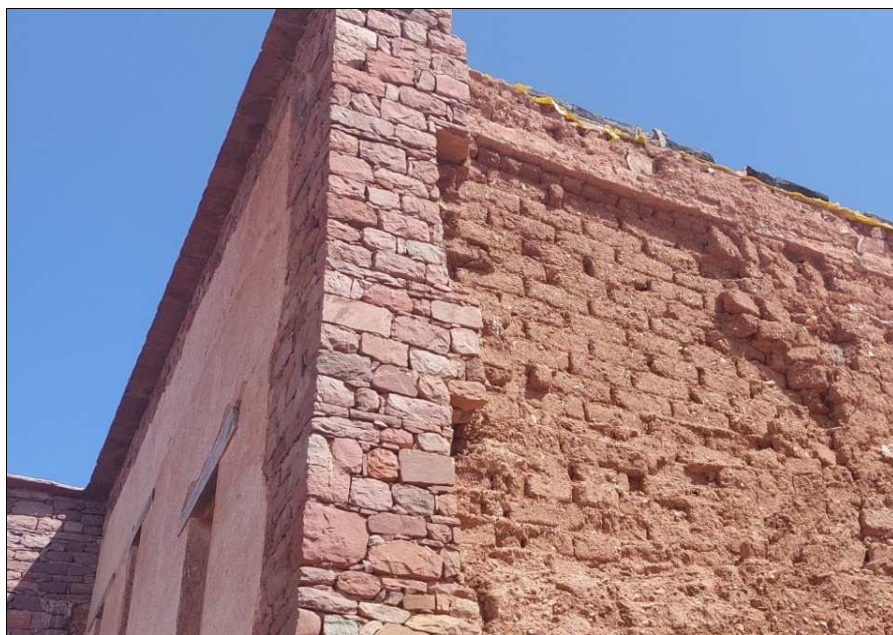
Pour la plupart des constructions en pente, le mur de soubassement n'est pas « nivelé » de manière à ce que tous les murs porteurs soient implantés au même niveau. Ces irrégularités peuvent conduire à des fissures aux endroits de variation de niveau, comme on peut le voir clairement ici exactement au point de changement de hauteur.

Fig. 33 : Exemple de mur de soubassement en gradin (Douar Aghllade, Iguidi, Taroudant)

Comme le montre les illustrations présentées et commentées ci-dessus, les dispositions constructives parasismiques relatives aux fondations sont rarement respectées. Ce qui peut être considéré comme l'un des facteurs qui ont aggravé les dommages des constructions.

3.4.2. Les murs porteurs

Dans le cas des constructions en matériaux locaux, les murs, en plus de leur rôle porteur des charges statiques, assurent le contreventement des constructions vis-à-vis des charges horizontales et donc de l'action sismique.



L'une des pathologies courantes des murs en maçonnerie d'adobe est celle relative à la mauvaise exécution-pose des blocs de terre.

En effet, l'appareillage appliqué pour l'emboîtement des blocs les uns sur les autres ne se fait pas souvent ou insuffisamment dans le sens transversal, créant ainsi des murs constitués de deux parois indépendantes sur les deux faces.

Fig. 34 : Exemple de pathologie de murs en adobe (Douar Ouirizen, Tahanaout, Al Haouz)

Ces murs de contreventement doivent être continus et monolithiques sur toute la hauteur de la construction. D'où l'importance de la qualité de mise en œuvre.



Parmi les pathologies constatées sur les murs en pisé, l'apparition de fissures horizontales et verticales aux niveaux des joints de reprise de coffrage, dues à la mauvaise liaison entre différents blocs de pisé. Cette liaison peut être assurée en préparant les surfaces de reprise de compactage par humidification de la dernière couche de terre de chaque banche.

Fig. 35 : Exemple de pathologie de mur en pisé (Douar Ighfis, Tizi n'Tast, Taroudant)

1 Le monolithisme de la structure porteuse des constructions, un principe parasismique
 2 essentiel qui doit être respecté, dépend de la qualité des matériaux utilisés, et surtout de
 3 la qualité de mise en œuvre. En effet, pour la plupart des constructions en terre
 4 diagnostiquées, les joints sont souvent mal traités et constituent les endroits de faiblesse
 5 structurale des murs porteurs.



L'absence de dispositifs assurant la liaison des murs au niveau de leur jonctions conduit à une dislocation des murs et donc à une réponse non parasismique de la construction, dans la mesure où l'ensemble des murs ne se comportent plus en bloc solidaire. Ceci peut être évité en veillant à la continuité des bandes de compactage au niveau des jonctions.

Fig. 36 : Exemple de pathologie liée à l'absence de dispositifs de liaison au niveau des jonctions des murs

7 Aussi, il a été constaté l'absence d'éléments de liaison et de chaînage des murs au niveau
 8 des jonctions des murs. Dans le cas du pisé, les joints verticaux des bandes
 9 correspondent parfois, voire systématiquement, à ces jonctions des murs, ce qui est très
 10 dangereux en cas d'absence d'éléments de liaison.



L'une des pathologies typiques de la maçonnerie en pierre, et qui est connue, est celle liée à l'absence ou à l'insuffisance des boutisses permettant de liasonner les deux parois-faces des murs. Il s'agit d'une pathologie due à la mauvaise mise en œuvre, mais qui est également conditionnée par la forme et la taille des pierres utilisées.

Fig. 37 : Pathologie typique des murs en maçonnerie de pierre liée à l'absence de boutisse de liaison des deux parois-faces des murs

1 En ce qui concerne les murs en maçonnerie de pierre, deux défauts liés à la mise en
 2 œuvre ont été relevés. Il s'agit des défauts d'alignement en plan qui concernent
 3 généralement que les constructions très anciennes, et le fameux défaut d'absence ou
 4 d'insuffisance de liaison entre les deux parois-faces des murs.



Les murs très anciens en maçonnerie de pierre sont souvent réalisés sans que leur alignement en plan soit assuré.

Cette irrégularité peut être à l'origine d'une réponse insuffisante à l'action sismique, surtout si la qualité de mise et des matériaux est insuffisante, tel que c'est le cas ici. A cela peut s'ajouter également l'absence et l'insuffisance de l'entretien.

Fig. 38 : Irrégularité d'alignement caractéristique des très anciennes constructions (Douar Afella Nouzgrouz, Iguidi, Taroudant)

6 Si la largeur des ouvertures ne dépasse généralement pas la limite recommandée pour
 7 les constructions parasismiques, leur renforcement n'est souvent pas suffisamment
 8 assuré. Il est également important de veiller à ce que la disposition et la répartition des
 9 ouvertures dans les murs ne conduise pas à une concentration des zones de faiblesse
 10 structurale.



Les ouvertures dans les murs (fenêtres et portes) constituent des zones de concentration des contraintes.

L'absence ou l'insuffisance de renforcement au niveau des ouvertures conduit à l'apparition de fissures diagonales qui peuvent être accentuées par une mauvaise disposition des ouvertures dans les murs.

Fig. 39 : Fissuration inclinée à l'endroit des ouvertures dues à l'absence ou l'insuffisance des dispositifs de renforcement (Douar Afella Nouzgrouz, Iguidi, Taroudant)

3.4.3. Les systèmes de renforcement

Prévoir des systèmes de renforcement des murs en matériaux locaux est certes important, mais il n'est pas suffisant ; encore faut-il veiller à leur bonne application. Dans le cas des éléments de renforcement en bois dont la longueur est limitée en comparaison avec la longueur des murs, des recouvrements suffisants doivent être assurés.



Il est important de prévoir des dispositifs de renforcement et de chaînage pour les murs, mais il faut que cela soit bien fait. Le chaînage horizontal, au niveau des jonctions des murs notamment, remplit son rôle quand sa continuité est bien assurée. Lorsque la longueur des éléments de chaînage (ici en bois) n'est pas suffisante, un recouvrement adéquat est nécessaire.

Fig. 40 : Recouvrement des éléments de chaînage en bois non assuré (Douar Amchkarjen, Ighil, Al Haouz)

Des défauts de continuité dans le cas des éléments de chaînage et de renforcement en béton armé ont également été relevés, même si le matériau permet des longueurs plus importantes. Ceci montre que la maîtrise des principes de chaînage et de renforcement structural ne sont pas suffisamment maîtrisés par les constructeurs et la main d'œuvre de la région.



L'utilisation du béton armé pour le renforcement vertical et horizontal se fait généralement de manière aléatoire et ne respecte pas de logique claire.

En effet, mis à part le chaînage horizontal qui forme en même temps les linteaux des fenêtres, des irrégularités liées à la continuité sont très courantes dans les constructions où ce type de renforcement est appliqué.

Fig. 41 : Continuité de chaînage en béton armé non assuré (Ighil Centre, Al Haouz)

3.4.4. Les linteaux et chaînages de couronnement

Le chaînage de couronnement des murs des constructions en matériaux locaux, qui, comme son nom l'indique, consiste à couronner l'ensemble des murs porteurs par une poutre de chaînage avant la mise en place de la structure du plancher-toiture est une technique de renforcement parasismique essentiel. Cependant, ce n'est pas une pratique courante dans la région impactée par le Séisme.



Dans certaines constructions en maçonnerie de pierre récemment réalisées, le principe de chaînage de couronnement est appliqué. Ce chaînage en béton armé est souvent réalisé au niveau des linteaux du dernier niveau.

C'est une bonne pratique, mais elle peut être encore améliorée en assurant la liaison avec la structure du plancher-toiture.

Fig. 42 : Continuité du linteau sur l'ensemble des ouvertures (Ighil centre, Al Haouz)

En réalité, le chaînage de couronnement doit être réalisé de manière à couronner les murs et en même temps former des appuis pour la structure du plancher-toiture. Aussi, dans le cas des bâtiments de plus d'un niveau, le renforcement vertical doit être prévu.



Les constatés sur le terrain montrent l'importance du chaînage du couronnement. Ici, il est intéressant de voir que la partie non chaînée du mur s'est partiellement effondrée, tandis que la partie chaînée, elle, reste stable. Cette interprétation est à prendre avec beaucoup de précaution car l'état du mur avant le Séisme n'est pas disponible.

Fig. 43 : Exemple illustrant le rôle important du chaînage de couronnement des murs avant la pose du plancher-toiture

A noter que le chaînage en béton armé n'est pas la seule option (Cf. Fig. 26). Des solutions en bois massif existent. D'ailleurs, c'est le matériau le plus compatible avec les constructions en terre non stabilisée. Les éléments en béton favorisent l'humidité et donc la dégradation des structures en terre.

3.4.5. Le plancher-toiture



Vu leur conception, les planchers-toitures traditionnels de structure en bois ont la particularité d'être porteurs dans une seule direction ; les murs porteurs sont perpendiculaires aux poutres maîtresses. Les murs dans la direction parallèle sont pratiquement non porteurs. Ils sont donc dissociés du plancher-toiture qui ne joue le rôle de diaphragme de contreventement que dans un sens.

Fig. 44 : Effondrement d'un mur en maçonnerie de pierre dû à l'absence de chaînage de couronnement

Les ouvrages en matériaux locaux (terre ou pierre) obéissent au critère de rupture de Mohr-Coulomb. Ce qui veut dire que la résistance au cisaillement latéral des murs porteurs, sous l'effet de l'action sismique horizontale, dépend de la contrainte normale verticale et du coefficient de frottement interne du matériau.



En l'absence de chaînage de couronnement des murs et dans le cas des planchers-toitures traditionnels, les murs non porteurs de la structure en bois du plancher-toiture sont les plus instables. Ici, on voit bien l'effondrement partiel du mur en parallèle aux poutres maîtresses ; c'est-à-dire celui qui ne supporte pas le plancher-toiture.

Fig. 45 : Effondrement d'un mur en pisé en l'absence de chaînage de couronnement (Douar Ighfis, Tizi n'Tast, Taroudant)

En considérant le sens de portance des planchers-toitures traditionnels, cette loi de Mohr-Coulomb explique donc pourquoi les murs parallèles aux poutres maîtresses sont ceux qui subissent plus de dommages. D'où l'intérêt du chaînage de couronnement qui permet de répartir le poids du plancher plus ou moins uniformément sur l'ensemble des murs, apportant ainsi une contrainte normale améliorant la résistance au cisaillement au niveau de la liaison mur-plancher.



Dans certains cas rares, pour lesquels la structure en bois des toitures est conçue de manière à ce que les poutres maîtresses soient porteuses dans les deux directions, les constructions ont mieux résisté à l'action sismique.

A noter que cette pratique n'est possible que lorsque la portée est relativement faible, comme c'est le cas ici.

Fig. 46 : Exemple de planchers-toitures conçues avec des structures porteuses dans les deux directions (Douar Afella Nouzgrouz, Iguidi, Taroudant)

Une autre solution à ce problème de répartition non équilibrée du poids du plancher sur les murs porteurs consiste à disposer les poutres maîtresses dans les deux sens comme illustré ci-dessus (Cf. Fig. 46).

3.5. Les constructions nouvelles

Les constructions relativement récentes sont de deux types : des constructions en matériaux locaux réalisés avec l'assistance technique des architectes et ingénieurs spécialisés et des constructions « hybrides » réalisées avec introduction massive du béton armé.

Ce dernier est souvent utilisé pour réaliser les planchers-toitures, les éléments de renforcement et dans certains cas les murs intérieurs. Dans d'autres cas, les étages sont entièrement construits en béton de ciment et produits dérivés. Ce type de construction, qui relève de la maçonnerie conventionnelle et doit respecter ses principes, n'est pas concerné par le diagnostic objet du présent rapport.

3.5.1. Conception et assistance technique

Pour des objectifs de comparaison, quelques bâtiments en matériaux locaux récemment construits ont été visités et diagnostiqués. Ces bâtiments ont été réalisés en ayant recours à l'assistance technique d'architectes et/ou d'ingénieurs spécialisés. Les travaux ont été exécutés par des constructeurs spécialisés et qualifiés.

Concernant la conception, les configurations en plan sont relativement simples, mais sans pour autant respecter le principe de symétrie (Cf. Fig. 47).



Fig. 47 : Exemples de configurations en plan de constructions nouvelles en matériaux locaux

Des formes en « L » sont souvent adoptées. Les ouvertures sont généralement trop importantes et leurs largeurs dépassent les deux mètres (Cf. Fig. 48), ce qui est nettement supérieures à la limite recommandée par les références réglementaires et normatives relatives au parasismique des constructions en matériaux locaux.



Fig. 48 : Les largeurs des ouvertures dans les nouvelles constructions dépassent parfois la limite recommandée

3.5.2. Matériaux et techniques de construction

Les nouvelles constructions diagnostiquées comportent les trois techniques de construction en matériaux locaux courantes : la maçonnerie de pierre, la maçonnerie de

- 1 blocs de terre (adobe) et le pisé. Au total, quatre bâtiments construits ou en cours de
2 construction ont été diagnostiqués. Il s'agit de :
- 3 – Un bâtiment en pisé avec une partie en pierre en un seul niveau ;
- 4 – Un bâtiment en deux niveaux : le premier entièrement en pisé et le deuxième
5 entièrement en adobe ;
- 6 – Un bâtiment en deux niveaux construit entièrement en adobe ;
- 7 – Un bâtiment en deux niveaux construit entièrement en pisé.



Fig. 49 : Dégâts très légers et insignifiants causés par l'action sismique

1 De toutes ces constructions qui sont implantées sur le même site, le bâtiment en deux
2 niveaux en appliquant deux techniques de construction en terre différentes, une par
3 niveau, est celui qui a été le plus impacté par la secousse sismique, sans pour autant
4 que les dégâts engendrés soient graves. En effet, les dégâts constatés se limitent à
5 quelques fissurations très légères au niveau du plancher haut du rez-de-chaussée et au
6 niveau des ouvertures (Cf. Fig. 49).

7 Ces dégâts relativement insignifiants dans l'absolu, mais qui ont une signification si l'on
8 compare aux bâtiments voisins, peuvent être expliquée par la différence de comportement
9 mécanique des deux matériaux utilisés (pisé en RDC et Adobe en étage), mais également
10 par le fait que ce bâtiment est déjà opérationnel et supporte en plus de son poids propre
11 des charges supplémentaires d'exploitation.



Fig. 50 : Construction en deux niveaux réalisés entièrement en maçonnerie en adobe

14 Par ailleurs, le bâtiment qui a mieux réagi à la secousse sismique est celui en deux
15 niveaux entièrement construits en adobe. Cela peut avoir comme explication le
16 monolithisme de la construction (tout en adobe) et la bonne ductilité du matériau grâce
17 aux fibres de paille, sans oublier le bon appareillage appliqué lors de l'exécution des murs
18 en maçonnerie d'adobe (Cf. Fig. 50).

3.6. Les constructions à caractère patrimoniale

20 Sont considérées comme construction à caractère patrimonial les constructions connues
21 et reconnues comme telles par les services compétents. Par ailleurs, il existe dans
22 certains sites-douars des constructions à usage d'habitation et qui, de par leurs âges,
23 leurs histoires et leur architecture, sont de vrais œuvres qui peuvent être considérées
24 comme faisant partie du patrimoine architectural national.

25 Ce paragraphe est consacré à la présentation et discussion des dommages causés par le
26 Séisme à quelques exemples de constructions patrimoniales connues. Il s'agit du site de
27 « Tinmel », le site de « Agadir Oufella » et les remparts de l'ancienne médina de Taroudant.

3.6.1. Note importante

Dans ce paragraphe il s'agit de présenter et de décrire l'ampleur des dommages constatés, de les analyser et de tenter de les expliquer sommairement en vue de formuler quelques solutions parasismiques non exhaustives, et qui doivent être mises au point et étudiées rigoureusement en effectuant un diagnostic plus approfondi avant d'envisager leur application.

3.6.2. Les constructions en terre : l'exemple de Tinmel

Le célèbre édifice de "Tinmel" est une construction qui date de plusieurs siècles, qui a subi plusieurs travaux de réhabilitation et d'entretien. Comme on peut le voir cette photo qui date d'avant la restauration de 1994 (Cf. Fig. 51), le mur nord est celui qui est le plus endommagé.



Fig. 51 : Vue du nord de l'édifice de Tinmel avant sa restauration de 1994 (Source internet : skyscrapercity.com)

3.6.2.1. Site et conditions d'implantation

La construction est implantée sur un terrain de pente relativement modérée. Cependant, sa taille importante (longueur d'environ 45 m) a fait que les quatre murs extérieurs sont implantés dans des conditions différentes (Cf. Fig. 52) :

(S) Le mur de la façade sud : réalisé sur un terrain relativement horizontal et loin des problèmes d'instabilité de pente ;

(N) Le mur de la façade nord : réalisé une pente plus importante de telle sorte que le mur subisse la pression des terres surtout en son milieu ;

^g Comme il a été déjà rappelé dans ce rapport, « Tinmel » signifie école ou lieu de formation et ne signifie absolument pas "mosquée" (ⵜⴰⵎⴰⵏⵏⵉⵍⴰ : Timzguida) même si le lieu remplissait certainement le rôle de mosquée. En effet, étymologiquement : Tinmel = Tin + Mel = Lieu de + Apprendre.

1 (E) Le mur de la façade est : réalisé perpendiculairement aux courbes de niveau, sa
2 hauteur vue de l'extérieur diminue en allant du sud au nord ;

3 (O) Le mur de la façade ouest : implanté dans les mêmes conditions que le mur de
4 l'est, mais sur la partie du site la moins stable compte tenu de la pente naturelle très
5 importante vers le cours d'eau qui se trouve à l'ouest du site. Des ouvrages de
6 soutènement du site ont d'ailleurs été mis en œuvre lors des derniers travaux de
7 réhabilitation.

8 Signalons que ces descriptions ne tiennent pas compte des détails de l'intérieur vu que les
9 décombres causés par le Séisme ne permettaient pas de faire un relevé précis.



Fig. 52 : Conditions d'implantation des quatre murs de façade de l'édifice « Tinmel » (Image-satellite avant séisme)

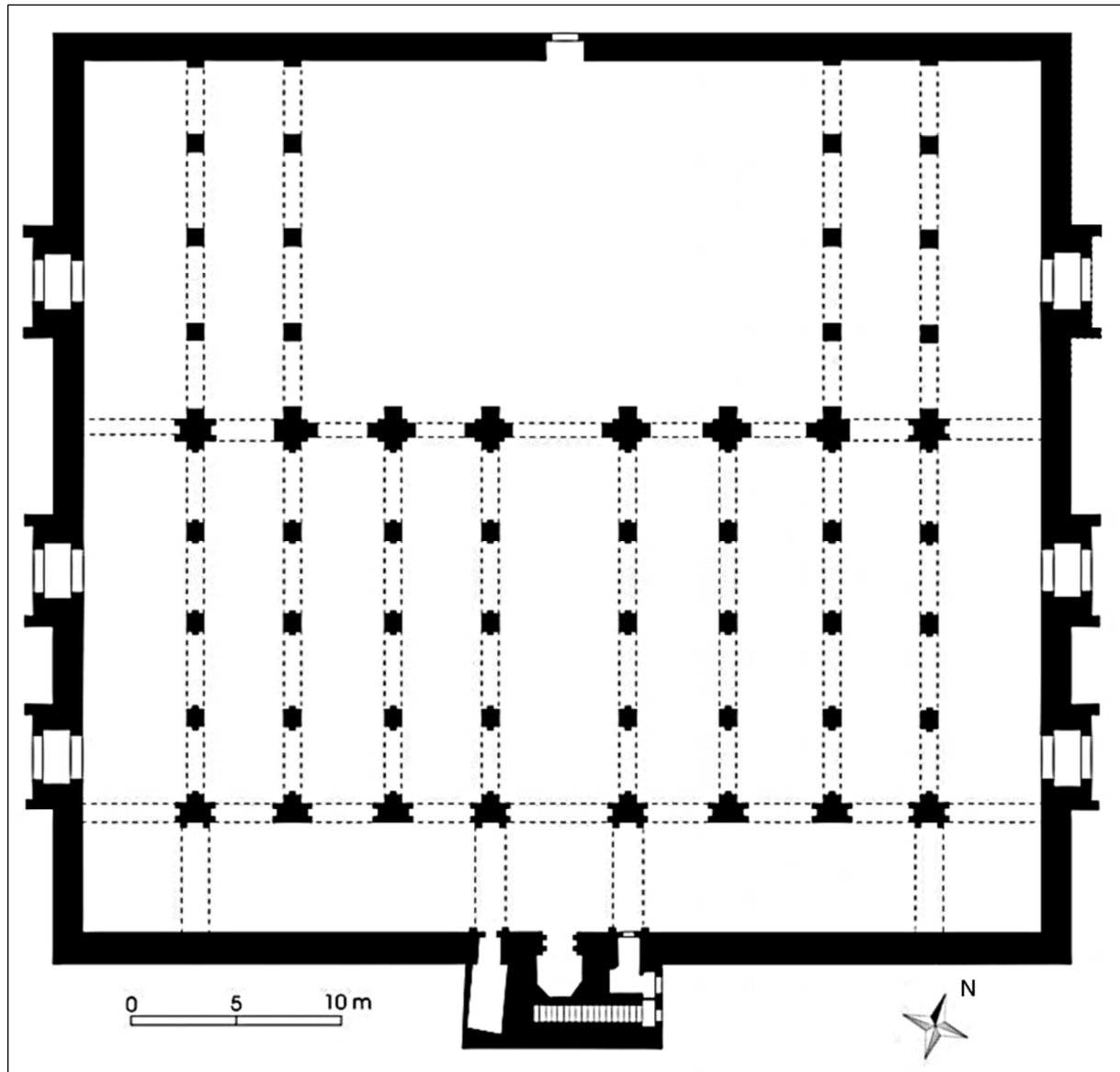
3.6.2.2. Architecture et régularité en plan

En termes de configuration en plan, la conception est rectangulaire simple. Elle prend quasiment la forme d'un carré. Ce qui est l'une des meilleures conceptions parasismiques, sinon la meilleure après la forme circulaire. La structure de la construction possède un plan de symétrie faisant de ses deux moitiés (E) est et (O) ouest deux parties parfaitement identiques (Cf. Fig. 53).

En plus des quatre murs formant les façades, la structure de la construction est composée d'un ensemble d'arcades disposés régulièrement et perpendiculairement à la façade sud. De ce fait, les quatre murs de façades ne bénéficient d'aucun autre mur de contreventement réel. En effet, il n'existe pas de murs continus à l'intérieur de la construction, et l'apport des arcades en termes de contreventement est limité compte tenu de leur forme, de la longueur des murs et des matériaux utilisés.

Néanmoins, les deux murs (E) est et (O) ouest sont partiellement contreventés par les murs au niveau des trois ouvertures (portes) sur chacune des façades. De même, le mur de la façade principale (S) sud bénéficie du minaret comme une sorte de contrefort

- 1 assurant le contreventement, mais pas suffisamment compte tenu de la longueur
2 importante du mur.



3
4 Fig. 53 : Vue en plan de la construction de Tinmel (adaptée à partir de books.openedition.org)

5 Le mur de la façade (N) nord reste le plus fragile du fait qu'il ne comporte aucun élément
6 de contreventement, en plus d'être affaibli pour une ouverture importante en son milieu
7 (porte nord). A ces constats relatifs à la conception en plan (conception de point de vue
8 structure), on peut ajouter l'épaisseur des murs qui reste insuffisante compte tenu de la
9 hauteur importante qui est d'environ 7 mètres (élancement trop grand).

10 3.6.2.3. Matériaux et mise en œuvre

11 Le pisé^h est la technique de construction principale appliquée pour la construction de
12 l'édifice « Tinmel ». Le pisé est renforcé avec des rondins de boisⁱ massif qui sont appliqués

^h Le type de la terre utilisée semble ne pas être le même pour tous les murs.

ⁱ Le diagnostic réalisé n'a pas permis de vérifier le renforcement pour tous les murs.

au niveau des joints de reprise de compactage. L'examen visuel sur place a permis de constater l'état de dégradation du bois utilisé, et sa densité qui visiblement n'est pas convenable dans la mesure où cela favorise la discontinuité des murs au niveau des joints. Si cette discontinuité n'est pas très grave au pieds des murs, elle est en revanche problématique au niveau de la partie supérieure des murs où le poids supporté n'est pas suffisant pour améliorer la résistance au cisaillement.



Fig. 54 : Exemples de dégâts relevés sur place après le Séisme

En ce qui concerne les arcades à l'intérieur de la construction, elles sont entièrement réalisées en maçonnerie de briques de terre cuite avec mortier de jointement à base de chaux. Cette différence importante en termes de comportement mécanique entre les deux techniques de construction crée des réponses sismiques "non harmonisées" des arcades en comparaison avec celles des murs en pisé. De plus, les briques de terre cuite sont également utilisées sur certaines parties des murs, principalement celles supérieures des murs des murs comme éléments servant d'appuis pour les toitures, et en bas des murs comme éléments de parement qui ont vraisemblablement été ajoutés dans le cadre de travaux d'entretien des dommages dues à l'action de l'humidité.

3.6.2.4. Synthèse et conclusions



Fig. 55 : Images-satellites montrant "Tinmel" avant et après le Séisme

1 Sur la base de ce qui a été présenté et discuté précédemment, et à part les arcades qui
2 restent les ouvrages les plus fragiles de la construction, il est évident que le mur de la
3 façade nord est le plus "faible" de point de vue structure, suivi des deux murs des façades
4 (S) sud et (O) ouest.



5
6 Fig. 56 : Vue du nord de l'édifice de Tinmel après le Séisme

7 Le mur le plus stable étant celui de la façade de l'est (E). D'où la différence de dégâts
8 constatés sur les quatre façades (Cf. Fig. 55). En effet, le mur qui a subi les dommages
9 les plus importants (effondrement presque total) est celui de la façade nord (Cf. Fig. 56).



10
11 Fig. 57 : Vue du sud-est de l'édifice de Tinmel après le séisme

12 De même, le mur de la façade (E) est, avec ses trois entrées, est celui qui a le plus résisté
13 à la secousse sismique. Par ailleurs, le minaret principalement en maçonnerie de pierre
14 qui se trouve au milieu de la façade sud est à moitié détruit (Cf. Fig. 57).

3.6.3. Les constructions en pierre : l'exemple d'Agadir Oufella

Le site de « Agadir Oufella^j » (ⴰⴳⴰⴷⵉⵔ ⵓⴼⵉⵍⵍⴰ) est une forteresse construite au milieu du 16^{ème} siècle par Mohammed Cheikh (sultan saadien) dans le cadre de la lutte contre l'occupation portugaise qui occupaient la côte près de Founty où ils ont établi une forteresse appelée « *Santa Cruz do Cabo de Gué* ». Depuis sa fondation « Agadir Oufella » a subi des modifications, restaurations et travaux de reconstructions jusqu'à 1960 où il a été fortement endommagé par le séisme très connu d'Agadir (Cf. Fig. 58). Ce paragraphe est dédié à la présentation et à la discussion des résultats d'un diagnostic post-sismique sommaire des murailles constituant l'enceinte du site.



Fig. 58 : Vues aériennes d'Agadir Oufella vers fins 1950 (gauche) et post-séisme de 1960 d'Agadir Oufella (droite)

3.6.3.1. Site et conditions d'implantation



Fig. 59 : Image-satellite d'Agadir Oufella avant (gauche) et après (droite) les derniers travaux de restauration

Agadir Oufella est construit sur une colline. Le tracé de la muraille suit plus ou moins la topographie du site de manière à permettre la meilleure vue sur l'océan. La pente du terrain est très raide vers le sud et l'ouest, et moins importante vers le nord et l'est.

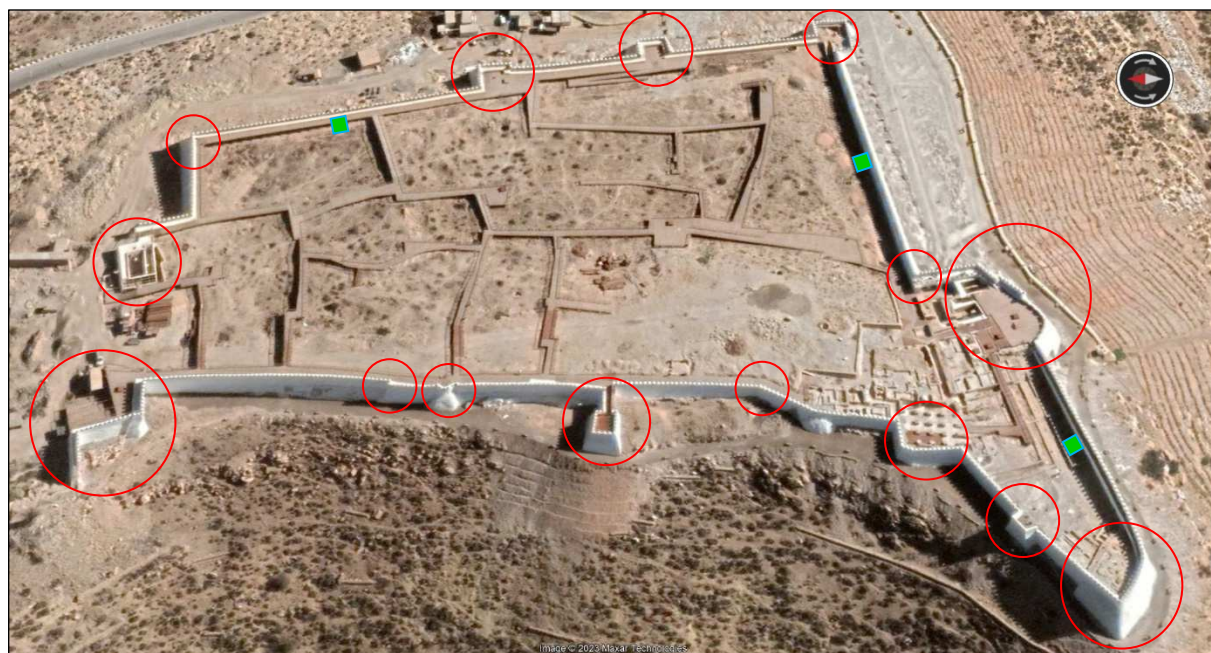
^j Etymologiquement le terme « agadir » (plur. igoudar) signifie en langue amazighe locale « mur » ou « forteresse ». Par extension, ce terme est utilisé pour désigner les remparts et les constructions de grande importance telles que les greniers collectifs connus dans la région du Grand Souss, et surtout dans l'Anti-Atlas. « Oufella = n'Oufella = n'Afella » se traduit par « du haut », « Agadir Oufella » signifie donc « Grenier collectif d'en haut ».

1 Les parties de la muraille situées à l'ouest (celles qui n'apparaissent pas sur la photo à
2 gauche (Cf. Fig. 59)) qui ont été entièrement ou presque entièrement détruites par le
3 séisme de 1960 sont implantées à la limite de la "plate-forme" de la colline.

4 **3.6.3.2. Conception et configuration en plan**

5 En termes de conception en plan, les remparts d'Agadir Oufella comportent plusieurs
6 singularités : angles de changement de direction, courbes, tours carrées (endroits
7 encerclés de la figure (Cf. Fig. 60)).

8 Ces tours ont l'avantage de diminuer la longueur de murs et de jouer le rôle de contreforts
9 permettant ainsi d'assurer leur contreventement. Cependant, une bonne liaison avec les
10 murs (fronts) au niveau de leurs jonctions doit être vérifiée.



12 Fig. 60 : Différents singularités visibles depuis l'image-satellite

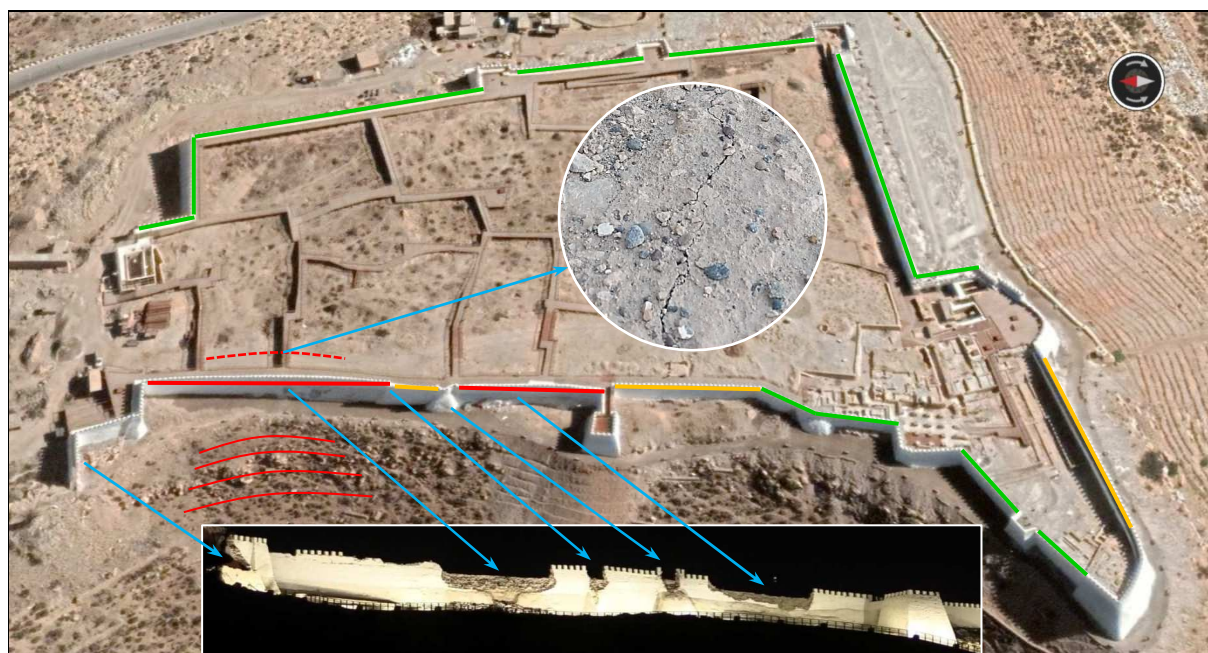
13 Le tracé en plan de la muraille ne suit aucune logique de régularité claire ; les murs
14 (fronts) sont implantés en suivant plus ou moins la topographie du site de manière à
15 éviter les grandes pentes dans la direction des murs, tout en permettant une meilleure
16 vue sur les côtes de l'océan.

17 Par ailleurs, la longueur de certains fronts (parties des murs entre tours ou angles) de
18 l'est et du sud paraît trop grande compte tenu des épaisseurs. Des contreforts pourraient
19 être envisagés pour remédier à ce "défaut" de conception (voir carrés en verts indiqués
20 sur la figure (Cf. Fig. 60)).

21 S'agissant des fronts de l'ouest dont le tracé en plan n'est pas droit, il est intéressant de
22 voir que ce sont les tronçons de murs qui ont été le plus impactés (Cf. Fig. 61). Cependant,
23 cette courbure n'est pas le seul facteur qui peut expliquer les dommages constatés.

24 L'endroit où cette partie de la muraille a été implantée est géotechniquement plus instable
25 comparé au reste du site. En effet, il a été relevé lors de la visite ce qui peut paraître
26 comme étant le début d'apparition d'une niche d'arrachement d'un glissement de terrain
27 (Cf. Fig. 61).

1 Il est envisageable^k de rectifier légèrement le tracé en plan des tronçons en courbe du
 2 mur de manière à former des segments d'alignement droit (solution à étudier), tout en
 3 veillant au respect du caractère patrimonial de la construction. Les points de jonctions
 4 des alignements droits créés peuvent si nécessaire être renforcés par des contreforts de
 5 formes et de dimensions adéquates (Cf. Fig. 62).



Trait vert : Alignement droit | Trait jaune : Défauts d'alignement | Ligne rouge : Tronçon en courbe
 Arcs en rouge continu : Terrain en glissement | Arc en rouge interrompu : Niche d'arrachement de glissement

Fig. 61 : Irrégularités en plan et instabilité de terrain pouvant expliquer l'effondrement partiel de certaines parties de la muraille

En plus d'assurer une régularité en plan comme l'un des principes de la conception parasismique, ces corrections de tracé du mur permettraient de s'éloigner du sol instable et d'éviter de le surcharger.



Fig. 62 : Rectification légère du tracé des parties des murs en courbe comme solution possibles aux irrégularités de la conception en plan

^k Attention ! "envisageable" de point de vue technique. La décision de modifier, même "légèrement", la construction doit prendre en considération son intégrité patrimoniale. Toute modification doit se faire dans le respect des textes réglementaires en vigueur.

Notons que, par ailleurs, les tronçons de murs qui ont été récemment entièrement restaurés ne comportent pas ces irrégularités qu'elles soient en plan ou en élévation, les mêmes tronçons qui malgré leurs longueurs importantes n'ont pas subi des dommages aussi graves. Cela montre que la construction et la restauration avec les moyens et les techniques d'aujourd'hui de manière à améliorer le comportement parasismique de ce type d'édifice est tout à fait possible.

3.6.3.3. Matériaux et mise en œuvre

En ce qui concerne les matériaux utilisés, force est de constater que les éléments de maçonnerie utilisés dans les parties effondrées de la muraille, ne sont pas de forme à assurer la stabilité vis-à-vis des secousses sismiques. En effet, les pierres utilisées, malgré leur grande taille, sont de forme enroulée. Les pierres allongées et aplaties recommandées pour la construction parasismique sont difficiles à trouver sur le site. A cela on peut ajouter les "défauts" d'exécution connus et fréquents dans les anciennes constructions en pierres, sans oublier les irrégularités de conception en élévation (variation non progressive de l'épaisseur) (Cf. Fig. 63).



Type et forme des pierres utilisées



Irrégularités en élévation et qualité de mise en œuvre

Fig. 63 : Qualité des matériaux et de la mise en œuvre aux niveaux des tronçons partiellement effondrés de la muraille

3.6.3.4. Parapet crénelé

Comme la plupart des anciennes enceintes, le sommet du rempart d'Agadir Oufella, est équipé d'une voie, dite chemin de ronde, aménagée en saillie à l'intérieur. Cette voie assurant une fonction militaire et destinée à la circulation des personnes, est protégé par un parapet (muret de défense construit au sommet de l'enceinte). Ce muret est crénelé, c'est-à-dire qu'il est formé à intervalle régulier et de créneaux (ouvertures) et donc de merlons (parties pleines du muret).

Ces merlons sont souvent les premières parties de l'enceinte à être impactées. En réalité, toute la partie composant le parapet est très instable du fait de l'amplification dynamique

- 1 au sommet du rempart causé par le changement brusque d'épaisseur et l'absence de
- 2 dispositifs de renforcement et d'attaches entre ces éléments et la partie principale basse
- 3 du rempart.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La stabilité sismique des constructions, qu'elles soient en matériaux locaux ou en matériaux dits conventionnels, dépend de plusieurs facteurs allant du choix du site de construction aux travaux de mise en œuvre, en passant par la conception et le dimensionnement de la structure porteuse, y compris le système de contreventement.

4.1. Synthèse et conclusions

Sur la base des données et des résultats du diagnostic réalisé et qui sont présentés et discutés dans la section précédente, il est possible de donner une analyse concise pouvant expliquer l'ampleur des dégâts constatés. Sont pris en considération dans cette analyse globale les principes et règles de la construction parasismique (Cf. Tab. 2), à savoir :

- **SIS.** La prise en compte de la géologie et de la sismicité du site de construction ;
- **IMP.** La bonne implantation de la construction dans le site de construction ;
- **CNC.** La bonne conception de la structure porteuse et de contreventement ;
- **EXE.** La qualité des matériaux utilisés et la bonne exécution des travaux ;
- **EXP.** L'entretien et la maintenance de la construction en phase d'exploitation.

A noter que ces explications ne concernent pas les constructions à caractère patrimonial tels que ceux dont les résultats de diagnostic sont présentés et discutés dans ce rapport (Tinnel et Agadir Oufella), et même certains douars très anciens dont l'âge des constructions se compte en siècles. Ce type de construction sont à analyser au cas par cas, même si les principes et les dispositions constructives parasismiques à respecter demeurent les mêmes.

Il est vrai de dire que la reconstruction d'un bâti patrimonial doit se faire de manière à retrouver ses caractéristiques originales. Mais, il est vrai aussi de dire qu'il est de la folie « *de faire la même chose et de s'attendre à un résultat différent* »¹. Reconstruire à l'identique un ouvrage qui n'a pas pu résister à un séisme, ne peut que subir le même sort lors d'un nouveau séisme. Par conséquent, les projets de restauration des constructions patrimoniales doivent intégrer le volet parasismique tout en veillant à la conservation de la valeur patrimoniale.

4.1.1. Sismologie et géologie [SIS]

L'une des raisons qui peuvent expliquer en partie l'ampleur des dégâts et dommages qu'ont subis les constructions de la région impactée réside dans le fait que le séisme lui-même est le plus puissant qui a été enregistré au Maroc. En effet, même les bâtiments qui ont été construits relativement récemment en respectant la réglementation parasismique en vigueur, l'ont été en considérant un zonage sismique qui ne correspond pas à la puissance du Séisme objet du présent rapport.

Aussi, la région est caractérisée par une forte « hétérogénéité géologique » qui se manifeste par la présence de plusieurs failles. D'ailleurs, une partie non négligeable des douars sont construits aux niveaux de ces failles. Ceci, n'est pas un problème en soi si la faille n'est

¹ Citation attribuée à Albert Einstein.

pas active, cependant, force est de constater que cet aspect lié à la géologie de la région n'a pas été pris en considération lors de la construction.

Par ailleurs, la question se pose dans quelle mesure, pour la reconstruction de la région impactée, les nouvelles données sismiques liées au séisme du 8 septembre 2023 doivent être prises en considération, sachant qu'il s'agit d'un séisme exceptionnel d'une période de retour importante.

4.1.2. Conditions d'implantation des constructions [IMP]

Les principales causes défavorables à la stabilité sismique des constructions constatées lors des visites effectuées, et qui sont liées aux conditions d'implantation, sont les suivantes :

- La construction sur des terrains qui sont géotechniquement instables y compris sur plaines (terrain exposé aux éboulements, sol meuble liquéfiable, pente instable, etc.) ;
- La construction sur sites à effet topographique important (crête de relief, pente importante, terrasse non stabilisée, etc.) ;
- Le groupement de constructions sur plaine sans joints sismiques, et sur pente sans distance de sécurité suffisante entre constructions et par rapport aux limites des terrasses ;
- L'inadéquation des conditions d'implantation des fondations pour certaines constructions (insuffisance de la profondeur d'implantation, dénivelée importante entre les semelles des murs de la même construction, défauts de conception relatifs au soubassement, etc.).

4.1.3. Conception des constructions [CNC]

L'architecture locale privilégie la symétrie et la régularité, principes qui rendent les structures plus résistantes face aux séismes. Aussi, les élancements des murs observés sont faibles et respectent bien les limites préconisées par les références de la construction parasismique en matériaux locaux. De même pour les ouvertures qui sont de taille réduite et ne dépassent pas 1 mètre de largeur.

Trois défauts principaux de conception de la structure sont à noter :

- Le premier est celui de l'absence, sinon de l'insuffisance, du chaînage de couronnement des murs servant d'appuis pour la structure des planchers-toitures. En effet, la conception de la structure du plancher-toiture traditionnel sans ce chaînage fait que seuls les murs perpendiculaires aux poutres maîtresses supportent les charges issues du plancher, rendant ainsi les deux autres murs fragiles faces aux contraintes de cisaillement engendrées par l'action sismique. De plus, l'absence de chaînage implique une concentration des contraintes au niveau des points d'appui des poutres sur les murs porteurs.
- Le deuxième défaut de conception est celui de l'absence des éléments de renforcement horizontal aux niveaux des jonctions des murs et l'absence des éléments d'attaches permettant la liaison entre les différents éléments de structures.
- L'utilisation non maîtrisée de constructions hybrides mélangeant les matériaux locaux aux matériaux conventionnels créant ainsi des structures non monolithiques.

4.1.4. Matériaux et mise en œuvre [EXE]

Les matériaux locaux utilisés pour construire sont généralement de qualités requises. En effet, la terre utilisée pour construire en pisé est, de point de vue texture, bien adaptée à cette technique (terre graveleuse avec un minimum de plasticité). De même, les pierres disponibles localement et qui sont utilisées pour construire sont de très bonne qualité en termes de résistance et de taille. Cependant, il existe certains cas rares de constructions où la pierre utilisée n'a pas la forme stable requise (forme enroulée), et d'autres cas où la pierre est d'une qualité exceptionnelle (forme aplatie).

Concernant la qualité de mise en œuvre, les constats suivants ont été relevés :

- La qualité de mise en œuvre insuffisante des murs de certaines constructions très anciennes dont on ne connaît pas l'âge (défauts d'alignement et verticalité, défauts de pose d'éléments de maçonnerie, etc.) ;
- La qualité de mise en œuvre est remarquablement supérieure dans les sites-douars dont l'accès est difficile et où l'introduction de matériaux industriels conventionnels ne s'est pas encore fait de manière massive ;
- Inversement, on constate une dégradation de la qualité de mise en œuvre pour les constructions très récentes, surtout dans les sites-douars faciles d'accès (sites à proximité de routes revêtues).

Les principaux défauts de mise en œuvre qui ont été relevés sont :

- Les défauts liés au traitement et préparation des joints de reprise de compactage pour les murs en pisé ;
- Les défauts de pose et d'emboîtement des éléments de maçonnerie dans le cas des murs en maçonnerie de pierre surtout au niveau des coins et des jonctions des murs.

Ces constats constituent une partie des éléments pouvant expliquer les raisons pour lesquelles certaines constructions ont été endommagées beaucoup plus que d'autres. Notons également que l'accès difficile à certains douars reculés du haut atlas a eu pour avantage de ne pas introduire massivement les matériaux à base de béton de ciment et d'acier, et de préserver, ainsi, un certain savoir-faire de construire en matériaux locaux chez les populations locales.

4.1.5. Exploitation et entretien [EXP]

Parmi les hypothèses principales de tous les règlements de conception et de dimensionnement des structures de bâtiments, on peut citer l'hypothèse selon laquelle les ouvrages conçus doivent bénéficier d'un entretien adéquat pendant leur exploitation.

En ce qui concerne les bâtiments à usage d'habitation construits en matériaux locaux, cet entretien est généralement assuré par les propriétaires. Cependant, deux constats négatifs doivent être signalés à ce sujet :

- L'exode rural et le fait que la plupart des jeunes ont dû quitter la région, pour des raisons économiques ou pour étudier en ville, a eu pour effet, en plus de déperdition du savoir-faire, de limiter les travaux d'entretien de ces constructions au strict minimum, c'est-à-dire à l'entretien de l'étanchéité au niveau des toitures. Ceci a conduit à la dégradation de la capacité résistante des murs porteurs non entretenus surtout au niveau de leurs limites inférieures et supérieures qui sont les plus impactées par l'humidité et l'érosion ;

- La surcharge des structures des toitures par l'ajout répété de couches de terre compactée ayant pour but de régler la pente et assurer l'étanchéité, au lieu de remplacer une partie des couches de terre déjà existante.

4.1.6. Synthèse non exhaustive

Le tableau suivant donne une synthèse non exhaustive des principales causes qui peuvent expliquer l'ampleur des dégâts constatés.

Tab. 2 : Synthèse globale concernant le respect des règles et principes de la construction parasismique

Principes et règles de construction parasismique		O	S	N
SIS	Prise en compte de la géologie et sismicité du site	☐	☐	☐
IMP	Préparation et stabilisation du terrain de construction	☐	☐	☐
	Fondation et implantation adéquate dans le site	☐	☐	☐
	Isolation structurale par rapport aux constructions voisines	☐	☐	☐
CNC	Prise en compte de la géotechnique du sol support	☐	☐	☐
	Régularité et symétrie en plan de la structure	☐	☐	☐
	Régularité et continuité en élévation de la structure	☐	☐	☐
	Monolithisme et homogénéité de la structure	☐	☐	☐
	Règles parasismiques particulières aux matériaux locaux	☐	☐	☐
EXE	Qualité des matériaux de construction	☐	☐	☐
	Mise en œuvre selon les règles de l'art	☐	☐	☐
EXP	Entretien régulier et suffisant	☐	☐	☐
[O] Plutôt oui [S] Selon les sites et les constructions [N] Plutôt non				

Ces éléments d'analyse peuvent être utilisés pour comparer les constructions récentes aux anciennes constructions en matériaux locaux d'une part, et pour comparer les constructions en matériaux locaux à celles en matériaux industriels conventionnels (Cf. Tab. 3).

Cette comparaison apporte des éléments d'analyse importants permettant d'expliquer les différences et la variation de l'ampleur des dégâts sur les constructions d'un site à un autre. Cette explication conduit à une conclusion générale et assez évidente qui permet de dire que le type de matériau de construction utilisé, malgré son importance, n'est pas en soi la cause principale des dégâts observés.

Tab. 3 : Facteurs de vulnérabilité sismique des différents types de constructions

Type de construction	Facteurs de vulnérabilité					Impact Global
	SIS	IMP	CNC	EXE	EXP	
Constructions anciennes en maçonnerie de terre	xxx	xxx	xx	x	xxx	Important
Constructions anciennes en maçonnerie de pierre	xxx	xxx	xx	xx	xx	Important
Constructions récentes en en maçonnerie de terre	xx	xx	x	xx	x	Modéré
Constructions récentes en maçonnerie de pierre	xx	xx	x	x	x	Modéré
Constructions (récentes) en matériaux conventionnels	xx	x	xx	xx	x	Modéré
Constructions (récentes) en terre-pierre assistées techniquement	x	x	xx	x	x	Faible

[xxx] : Facteur de vulnérabilité principal | [x] : Facteur de vulnérabilité secondaire
SIS : Sismologie | **IMP** : Implantation | **CNC** : Conception | **EXE** : Exécution | **EXP** : Exploitation

4.2. Recommandations et propositions

L'opération de la reconstruction des régions impactées par le Séisme, que les matériaux et les techniques de construction choisis soient locaux ou conventionnels, doit être menée de manière à permettre le respect des concepts et principes de la construction parasismique. Il s'agit d'éviter les mauvaises pratiques constatées sur le terrain et d'encourager la reproduction des bonnes pratiques maîtrisées par la population locale.

Cela implique un travail pluridisciplinaire qui fait appel aux à plusieurs qualifications et domaines de spécialité. Sans oublier, bien évidemment, la sensibilisation, l'encadrement et l'implication des populations concernées, surtout pour les cas où l'auto-construction est envisagée.

4.2.1. Phasage et planification de la reconstruction

Compte tenu du délai de 12 mois fixé pour achever le relogement des populations sinistrées, une planification globale de l'opération de la reconstruction doit être établie. Dans ce sens, le phasage suivant peut être adopté (Cf. Tab. 4) :

• Phase PH. 0 : Préparation et actualisation des textes réglementaires

Il s'agit de la préparation des textes procéduraux et des documents techniques, réglementaires et normatifs nécessaires pour assurer l'encadrement du projet de la reconstruction et permettre de faciliter l'assistance technique lors des travaux de construction.

Certains documents existants, tels que les Règlements Parasismiques marocains, doivent être actualisés en prenant en considération les nouvelles données relatives à l'activité sismique nouvellement enregistrée.

Si nécessaire, il faut préparer des guides d'application et organiser des actions de formation au profit des professionnels concernant ces documents afin de faciliter leur exploitation.

1 • **Phase PH. A : Choix et validation des sites de construction**

2 Le choix et la validation des sites de construction et la vérification de leur constructibilité
3 doit tenir compte des considérations, prescriptions et recommandations du cahier de
4 charges à établir. A noter que certains sites doivent être conservés indépendamment de
5 la constructibilité du terrain en raison de leur caractère patrimonial.

6 Par ailleurs, la prise en compte des avis des populations concernées et la disponibilité de
7 nouveaux terrains constructibles sont à considérer, ainsi que l'ensemble des acteurs
8 locaux.

9 Cette phase n'est donc pas une affaire purement technique, et elle demande par
10 conséquent la concertation de tous les acteurs concernés. L'étroite collaboration entre
11 ces derniers est une condition sine qua non pour la réussite de cette phase.

12 • **Phase PH. B : Identification des constructions à conserver et à conforter**

13 Cette phase ne peut pas être dissociée de la phase précédente. En effet, les deux phases
14 sont complémentaires. Il s'agit ici d'identifier sur la base d'un diagnostic sommaire les
15 constructions dont l'état de conservation permet une réhabilitation sans avoir à les
16 démolir en vue d'une nouvelle construction. Cela dépendra essentiellement de l'état de
17 conservation de la structure porteuse.

18 La décision de conserver un site (douar) en vue de sa réhabilitation dépendra des
19 résultats de la phase précédente et de l'existence ou non de constructions réhabilitables.

20 • **Phase PH. C : Stabilisation des terrains et protection des sites de construction**

21 La stabilité géotechnique des sites de construction actuels conservés et les nouveaux
22 sites de construction choisis sont à étudier, surtout dans le cas des terrains en pente.

23 Sachant que les travaux de terrassement et d'aménagement, ainsi que les surcharges
24 dus aux poids des constructions ont un impact significatif sur la stabilité des pentes,
25 des solutions de stabilisation de ces terrains ainsi que les terrains environnants doivent
26 être proposées et mise en œuvre.

27 De même, des solutions techniques doivent être proposées et appliquées aux sites
28 conservés et qui présentent d'autres formes d'instabilité géotechnique ou un risque
29 d'inondation.

30 • **Phase PH. D : Aménagement et viabilisation des sites de construction**

31 L'aménagement des sites de constructions, qu'ils soient anciens ou nouveaux doit
32 respecter les textes réglementaires en vigueur tout en tenant compte des contraintes
33 qu'imposent certaines dispositions liées à la stabilité des terrains dont règles principales
34 doivent être prescrites dans le cahier de charges à établir.

35 Cet aménagement doit aussi garantir l'accès et la salubrité des lieux.

36 • **Phase PH. E : Plans d'architecture et d'exécution des constructions**

37 Il s'agit d'établir des plans d'exécutions pour les populations concernées au niveau de
38 chaque site (douar). Il s'agit aussi d'encadrer les interventions de réhabilitation des
39 constructions conservées selon un plan d'actions établies sur la base de diagnostics
40 réalisés au cas par cas.

41 • **Phase PH. F : Travaux d'exécution des constructions (logements)**

42 La dernière phase est celle des travaux d'exécution des constructions nouvellement conçues,
43 qui vont remplacer les constructions qui se sont effondrées et qui ne peuvent pas être
44 réhabilitées.

1 Tab. 4 : Proposition d'un phasage de l'opération de la reconstruction

Phases	Compétences concernées	Observations
PHASE 0 : Préparation, actualisation et communication de documents réglementaires et normatifs	Sismologues, géologues, ingénieurs spécialisés, etc.	Certaines références techniques doivent être actualisées en tenant compte des nouvelles données sismiques.
PHASE A : Choix et validation des sites de construction et vérification de leur constructibilité	Sismologues, géologues, ingénieurs géotechniciens, etc.	Certains sites seront conservés indépendamment de la constructibilité du terrain en raison de leur caractère patrimonial.
PHASE B : Recensement, identification des sites et des constructions à réhabiliter	Architectes, ingénieurs spécialisés, etc.	
PHASE C : Etude de stabilité géotechnique et stabilisation des terrains de construction	Ingénieurs spécialisés (géotechniciens notamment, mais pas que), entreprises travaux, etc.	Stabilisation et aménagement en prenant en considération les constructions conservées, Plans de masse, d'assainissement et de voiries, etc.
PHASE D : Etude et réalisation de l'aménagement et lotissements des sites à construire	Urbanistes, architectes, ingénieurs topographes, ingénieurs géotechniciens, entreprises et coopératives travaux.	
PHASE E : Conception des nouvelles constructions et réhabilitation des constructions conservées	Architectes et ingénieurs spécialisés.	Collaboration étroite entre l'architecte et l'ingénieur structure pour une bonne application du règlement parasismique.
PHASE F : Construction (auto-construction) des bâtiments des différents sites nouvellement conçues	Coopératives locales (auto-construction), Entreprises travaux.	Construction assistée par les architectes et les ingénieurs spécialisés.

2 Une proposition de planning plus ou moins détaillé est donnée en annexe de ce rapport
3 (Cf. Annexe C). Ce planning peut être amélioré et enrichi en fonction des données
4 disponibles et des particularités de chaque site de construction.

5 4.2.2. Assistance technique à la reconstruction

6 4.2.2.1. Gestion stratégique de la reconstruction

7 Pour garantir une gestion efficace de la reconstruction des régions impactées par le
8 Séisme, il est recommandé de :

- 9 **a.** Créer un comité central d'experts et de spécialistes composés de sismologues,
10 géologues, architectes, ingénieurs spécialisés, etc. Ce comité aura pour rôle de
11 répondre rapidement aux questions techniques et demandes des professionnels
12 chargés de l'assistance technique ;
- 13 **b.** Responsabiliser les différents intervenants, notamment les intervenants chargés
14 du suivi et de l'assistance technique. Cela peut se faire en permettant et en
15 incitant les architectes et ingénieurs spécialisés intéressés à « parrainer » des
16 sites-douars en vue de reconstruction ;

- c. Orienter, dans la mesure du possible, les populations concernées et qui opteraient pour l'auto-construction à s'organiser autour de coopératives d'artisans constructeurs (maalems). Ces coopératives permettront de faciliter la coordination, l'ordonnancement et le pilotage de la reconstruction au niveau de chaque site (douar) ;
- d. Démarrer les travaux de reconstruction et/ou de réhabilitation au niveau de chaque site par des projets-types de construction et de réhabilitation en vue de former et sensibiliser la main d'œuvre locale sur les techniques de construction parasismique. Les bâtiments collectifs tels que ceux des associations locales peuvent servir de projets-types.

4.2.2.2. Organigramme de l'assistance technique

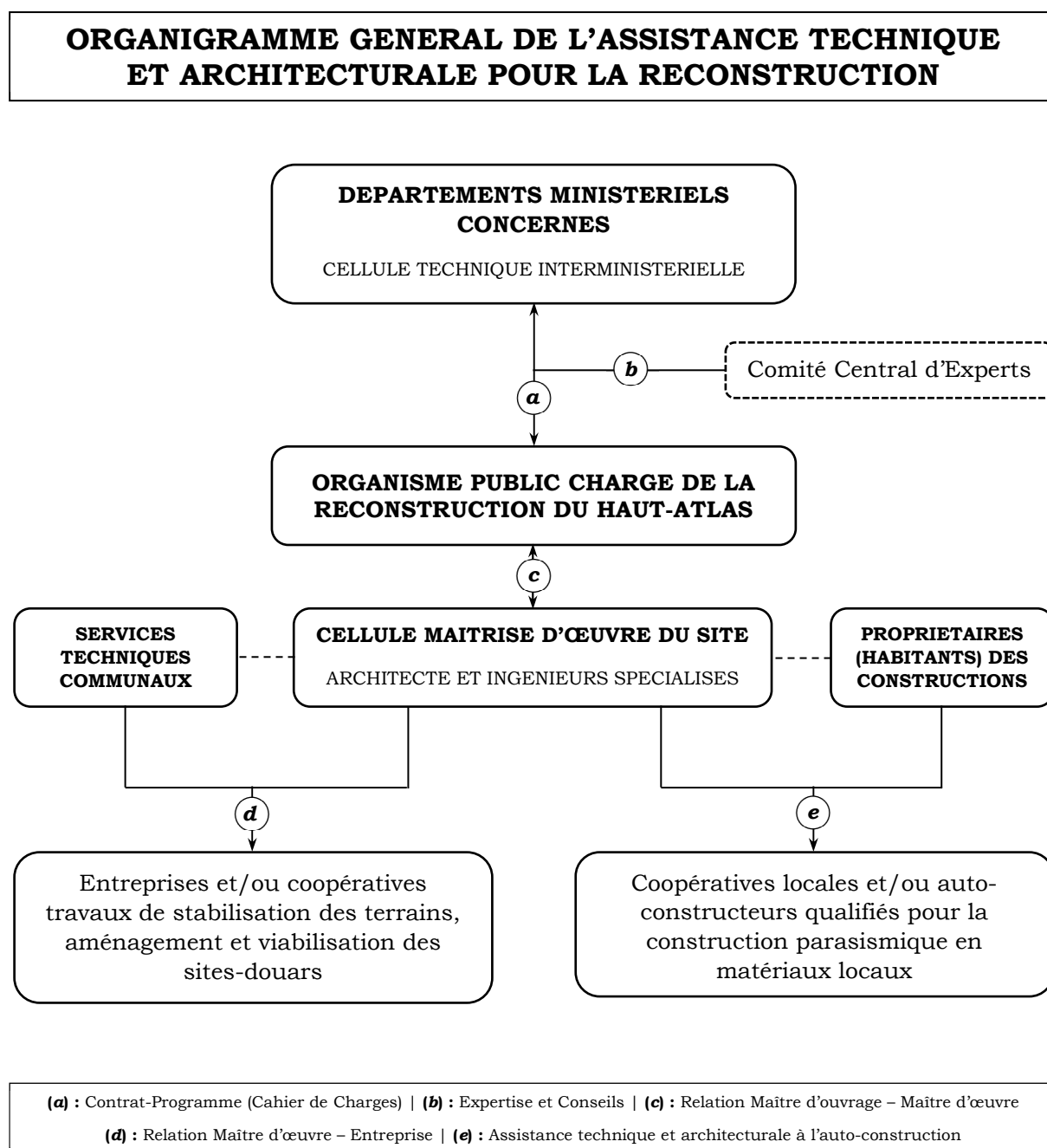


Fig. 64 : Organigramme général de l'assistance technique et architecturale

Dans le but d'assurer la coordination entre les différents intervenants et de faciliter l'assistance technique et architecturale, et dans l'hypothèse où les recommandations précédentes sont acceptées, l'organigramme ci-dessus peut être adopté (Cf. Fig. 64).

Cet organigramme reste une proposition donnée à titre indicatif. Il peut donc être amélioré et enrichi en fonction des données disponibles et des particularités de chaque site-douar.

4.2.2.3. Points de contrôle des travaux de reconstruction

Lors des travaux de reconstruction (construction nouvelle ou réhabilitation), au moins les tâches suivantes sont à contrôler par les intervenants concernés (Cf. Tab. 5).

Les points critiques de contrôle correspondent à des tâches de réalisation d'ouvrages de structure délicats ou à des travaux d'exécution d'ouvrages non porteurs mais dont les défauts de mise en œuvre pourraient impacter gravement les éléments de structure. Ces tâches nécessitent donc un suivi et un contrôle continu durant leur réalisation.

Les points d'arrêt correspondent à l'achèvement de la réalisation d'un ouvrage de structure ou d'une partie d'un ouvrage de structure important. La conformité d'un tel élément de structure doit être vérifiée par un contrôle extérieur avant de pouvoir poursuivre les travaux de construction.

Chaque contrôle extérieur réalisé par les intervenants concernés doit être sanctionné par un procès-verbal attestant de la conformité ou non des ouvrages vérifiés. Ces procès-verbaux sont d'une grande utilité pour la gestion financière des travaux de reconstruction.

Tab. 5 : Liste des points de contrôle des travaux de construction en matériaux locaux

Tâche	Eléments de contrôle	Point critique	Point d'arrêt	Chargés de contrôle
F0	Communication des plans d'exécution aux propriétaires et implantation : - Conformité à l'architecture régionale ; - Conformité au règlement parasismique.		×	Architecte Bureau de Contrôles
F1	Implantation et traçage des limites de terrassement : Conformité aux plans parcellaire et de masse validés.	×		Ingénieur topographe
F2	Terrassement pour fondations et réception du sol support : - Conformité du sol aux données de conception ; - Conformité aux plans d'exécution.		×	Laboratoire
F3	Formulation, élaboration et réception des matériaux et matériel de construction : - Convenance des matériaux à la technique de construction ; - Conformité des performances des matériaux aux hypothèses de conception ; - Convenance des conditions de stockage.	×		Architecte Laboratoire Bureau d'Etudes
F4	Exécution et réception des fondations et du soubassement : - Conformité des ouvrages réalisés aux plans d'exécution et aux données de conception ; - Respect des règles parasismiques de mise en œuvre.		×	Architecte Bureau d'Etudes

F5	Exécution et réception des murs et des ouvrages en élévation : - Conformité des murs réalisés aux plans d'exécution et aux données de conception ; - Respect des règles parasismiques de mise en œuvre ; - Conformité des systèmes de renforcements, des linteaux et des systèmes de chaînage aux plans d'exécution ; - Bonne exécution des dispositifs de protection contre l'action de l'eau ;	x		Architecte Bureau d'Etudes
F6	Exécution et réception de la structure du plancher et toiture : - Conformité de la structure du plancher-toiture réalisée aux plans d'exécution et aux données de conception ; - Conformités des systèmes d'attaches aux plans d'exécution et aux données de conception ; - Respect des règles parasismiques de mise en œuvre.		x	Architecte Bureau d'Etudes
F7	Exécution et réception des ouvrages non porteurs et des ouvrages de finition : - Respect des septicités architecturales de la région ; - Compatibilité des matériaux de finition avec les matériaux de structure ; - Protection des ouvrages sensibles à l'eau contre l'humidité.	x		Architecte Bureau d'Etudes

Point critique : Tâche délicate qui nécessite un suivi et un contrôle continu durant sa réalisation.

Point d'arrêt : Tâche à la fin de laquelle les travaux d'exécution doivent être arrêtés en attendant la vérification de sa conformité par un contrôle extérieur avant de pouvoir entamer la tâche suivante.

4.2.3. Réhabilitation, restauration et renforcement structural

Les interventions de réhabilitation et de renforcement structural sur une construction en matériaux locaux doivent être effectuées de manière à ce que toutes les exigences nécessaires soient remplies pour garantir sa stabilité structurelle, l'intégrité de sa valeur patrimoniale et la sécurité de ses occupants. Le renforcement structural parasismique d'une construction doit être orienté de manière à ce que les structures obtenues puissent :

- Résister avec des dommages mineurs lors de séismes de faible intensité ;
- Limiter les dommages aux éléments non structuraux lors de séismes d'intensité moyenne ;
- Eviter l'effondrement global de la structure lors de tremblements de terre graves.

Par ailleurs, la planification de l'entretien de la construction concernée doit être envisagée afin de garantir la permanence dans le temps des hypothèses de conception envisagées.

D'une manière générale, un projet de réhabilitation d'une construction comprends les phases suivantes :

1 • **1° Phase : Réhabilitation provisoire**

2 Il s'agit de maintenir provisoirement la construction dans son état de conservation
3 actuel en attendant la réhabilitation permanente qui sera réalisée sur la base d'un
4 diagnostic et d'une étude de réhabilitation bien établie.

5 • **2° Phase : Diagnostic en vue de réhabilitation permanente**

6 C'est une phase essentielle dans un projet de réhabilitation d'une construction. Il s'agit
7 de faire un diagnostic technique méticuleux de la construction en vue de proposer des
8 opérations de réhabilitation et de renforcement pertinentes, optimales et efficaces.

9 • **3° Phase : Analyse et d'exploitation des résultats du diagnostic**

10 Phase de traitement des données recueillies. Des données qui seront utilisées pour faire
11 des analyses et des simulations visant à vérifier la stabilité structurelle de la construction
12 et de repérer les endroits et points de faiblesse de la structure.

13 • **4° Phase : Intervention de réhabilitation et de renforcement**

14 Cette phase comporte deux sous-phases :

15 Une étude de conception des renforcements éventuels à envisager, et de manière générale,
16 les détails des opérations de réhabilitation à réaliser, tenant compte des résultats des
17 phases précédentes.

18 Les travaux d'exécution des opérations de réhabilitation proposées qui doivent être
19 réalisés sous l'assistance technique des équipes ayant participé au diagnostic et à la
20 conception des solutions proposées.

21 • **5° Phase : Exploitation et entretien de la construction**

22 Les opérations de réhabilitation doivent prévoir un plan d'entretien adéquat de manière
23 à assurer la durabilité de la réhabilitation réalisée.

5. LIMITATIONS DU DIAGNOSTIC

Les résultats de ce travail de diagnostic post-séisme, qui sont présentés, analysés et discutés dans ce rapport ne sont pas de nature à être généralisés ou transposés ailleurs. Ils peuvent être utilisés à titre de comparaison. Dans ce dernier cas, les résultats obtenus doivent être contextualisés en considérant les spécificités architecturales et constructives de la région étudiée, et en tenant compte des caractéristiques des sites visités.

En effet, même si les sites et constructions diagnostiqués ont été choisis de manière à former un échantillon avec une certaine représentativité de la réalité, l'honnêteté intellectuelle et la rigueur scientifique oblige à signaler certaines limitations du travail réalisé.

D'abord, la taille de l'échantillon des constructions diagnostiquées qui reste malgré son importance limitée compte tenu de l'étendue du territoire impacté par le séisme.

Ensuite, les sites-douars visités sont pour une large part des sites accessibles de par leur proximité des voies et routes principales de la région. De ce fait, les sites-douars reculés sont sous-représentés dans l'échantillon étudié. A noter que les techniques de constructions en matériaux locaux sont mieux maîtrisées dans ces zones reculées, la construction en matériaux industriels conventionnels y est peu présente en raison de l'accès difficile qui ne facilite pas l'importation ces matériaux en quantité importante. Ceci, peut constituer un élément d'analyse qui permet d'expliquer le fait que les constructions traditionnelles ont mieux résisté dans ces endroits.

Enfin, certains facteurs et effets de sites qui peuvent aggraver les dégâts et les dommages causés aux constructions n'ont pas suffisamment été considérés lors de la discussion. Il s'agit plus particulièrement des caractéristiques géologiques des sites, notamment en ce qui concerne la présence des failles. A titre d'exemple, certains sites-douars tels que ceux d'Adassil (Chichaoua), Ighil (Al Haouz) et Tizi n'Tast (Taroudant) sont situés sur des failles géologiques déjà connue.

Aussi, la présence de certaines mines exploitées ou abandonnées, et dans une moindre mesure, la présence de barrages et de grands travaux de terrassement liés aux réseaux routiers, sont des données dont l'impact sur l'ampleur des dégâts n'a pas été étudié.

REFERENCES

- [1] MATNUHPV (2020). Recueil de la Règlementation Technique relative à la Construction (Tome 1) : Conception des bâtiments (Règlement Parasismique pour les Constructions en Terre 2011)
- [2] A. DERROUCH et Y. MELEHI (2008). Les architectures régionales – Région de Tensift : Analyse et recommandations. Edition 2008.
- [3] K. MOULAY M'HAMED (2008). Les architectures régionales – Région du Sud : Analyse et recommandations. Edition 2008.
- [4] INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR EARTHQUAKE ENGINEERING (2004). Guidelines for Earthquake Resistant Non-Engineered Construction
- [5] G. MINKE (2001). Construction Manual of Earthquake-Resistant Houses of Earth.
- [6] UNITED NATION CENTRE OF REGIONAL DEVELOPMENT (2003). Guidelines for Earthquake Resistant Design, Construction, and Retrofitting of Buildings in Afghanistan.
- [7] INDIAN STANDARD 13827 (2003) Improving earthquake resistance of earthen buildings. Guidelines
- [8] WILFREDO CARAZAS AEDO (----). Guide de construction parasismique.
- [9] AFPS (2012). Dispositif Urgence AFPS : Contexte, objectifs, méthodologie et procédures.

ANNEXES

Annexe A : Fiche de diagnostic post-sismique

DIAGNOSTIC POST-SISMIQUE DES CONSTRUCTIONS EN MATERIAUX LOCAUX

Nom de l'enquêteur :

Date diagnostic : / /

0. Informations générales

0.0. ID du site :

0.1. Lieu de la visite : ☐ (Péri)Urbain ☐ Rural

0.2. Adresse du site visité :

☐ Province/Préfecture :

☐ Commune :

☐ Quartier/Douar :

0.3. Morphologie du site :

☐ Terrain horizontal ☐ Terrain en pente (forte) ☐ Terrain en pente (modérée) ☐ Colline (crête)

0.4. Géologie et géotechnique du site :

☐ Plutôt stable (pas de mouvements) ☐ Plutôt instable (mouvements visibles) ☐ Failles ☐ Ne sait pas

0.5. Environnement du site :

☐ Site inondable (cours d'eau) ☐ Site exposé aux chutes de blocs ☐ Présence d'arbres et végétations

1. Premier niveau du diagnostic : à l'échelle d'un groupement de constructions

1.0. Type de constructions dominant (Indiquer %) :

☐ Maçonnerie de pierre : ☐ Terre (pisé, adobe) : ☐ Béton de ciment : ☐ Mixtes :

1.1. Densité des constructions (occupation du sol) :

☐ Dispersées ☐ Plutôt dispersées ☐ Plutôt concentrées ☐ Groupées

1.2. Etat de conservation des constructions :

☐ Intact (invisible) ☐ Effondrement partiel (certaines constructions) ☐ Effondrement (Presque) total

1.3. Estimation du taux des constructions effondrées entièrement (ou presque) :

☐ 0% ☐ 10% ☐ 20% ☐ 30% ☐ 40% ☐ 50% ☐ 60% ☐ 70% ☐ 80% ☐ 90% ☐ 100%

1.4. Type de constructions effondrées entièrement (ou presque) :

☐ Constructions en pierre ☐ Constructions en terre ☐ Constructions en béton de ciment ☐ Constructions mixtes

1.4. Emplacement des constructions entièrement effondrées [à décrire] :

1.5. Autres renseignements utiles :

2. Deuxième niveau du diagnostic : à l'échelle d'une construction
2.0. ID du site de la construction :
2.1. Catégorie de la construction : ☐ Classe I : Importance vitale ☐ Classe II : Grand public ☐ Classe III : Habitation
2.2. Age de la construction : ☐ Très ancienne ☐ Relativement ancienne ☐ Relativement récente ☐ Très récente
2.3. Technique de construction : ☐ Béton et maçonnerie conventionnelle ☐ Maçonnerie de pierre ☐ Pisé ☐ Adobe ☐ Mixte
2.4. Niveaux et hauteur : ☐ Moins de 4 m (un seul niveau). ☐ Moins de 7 m (deux niveaux). ☐ Plus de 7 m (plus de deux niveaux)
2.5. Sol support de la construction : ☐ Rocher ☐ Sol ferme ☐ Sol meuble ☐ Sol mou ☐ Autre :
2.6. Conditions d'implantation : ☐ Horizontale ☐ Inclivée ☐ En gradin ☐ Soubassement ☐ Chaînage ☐ Autres :
2.7. Interactions avec les constructions voisines : ☐ Pas de contact ☐ Joints entre constructions ☐ Contact sans joints ☐ Mur mitoyen (commun)
2.8. Régularité de la construction en plan : ☐ Deux axes de symétrie ☐ Un axe de symétrie ☐ Pas de symétrie ☐ Bon rapport Longueur/Largeur
2.9. Régularité de la construction en élévation : ☐ Plutôt régulière ☐ Plutôt irrégulière ☐ Ne sait pas
2.10. Système de contreventement : ☐ Murs simples ☐ Murs chaînés ☐ Portiques ☐ Système mixte ☐ Autres :
2.11. Ouvertures dans les murs : ☐ Respect des principes parasismiques ☐ Non-respect des principes parasismiques
2.12. Systèmes de renforcements : ☐ Chaînage horizontal en bois ☐ Chaînage horizontal en béton ☐ Chaînage vertical
2.13. Planchers et toitures : ☐ Dalle en béton armé ☐ Structure métallique ☐ Structure en bois ☐ Autres :
2.14. Qualité des matériaux de construction : ☐ Bonne ☐ Moyenne ☐ Mauvaise ☐ Ne sait pas
2.15. Qualité de mise en œuvre : ☐ Bonne ☐ Moyenne ☐ Mauvaise ☐ Ne sait pas
2.16. Entretien de la construction : ☐ Suffisant ☐ Insuffisant ☐ Ne sait pas

2.17. Etat de conservation de la structure porteuse :					
Etendue dommages →	D5 : Destruction	D4 : Très graves	D3 : Importants	D2 : Moyens	D1 : Légers
Structure verticale					
Structure horizontale					
Connections					
Appréciation global					

2.18. Etat de conservation de la structure non porteuse :			
Présence dommages →	Oui	Non	Description sommaire des dommages constatés
Murs non porteurs et cloisons			
Eléments de menuiserie			
Ouvrages de finition			
Appréciation global			

Annexe B : Exemple d'utilisation de la fiche de diagnostic post-sismique



Photo IGH 03 01 : Vue panoramique sur douar Ighfis (Tizi n'Tast, Taroudant)



Photo IGH 03 02 : Exemple de bâtiment non effondré sur douar Ighfis (Tizi n'Tast, Taroudant)

DIAGNOSTIC POST-SISMIQUE DES CONSTRUCTIONS EN MATERIAUX LOCAUX

Nom de l'enquêteur : *A. KOUTOUS / S. EL AICH*

Date diagnostic : *22/09/2023*

O. Informations générales

0.0. ID du site : *T - TT - IGH03 (Photo IGH03 01)*

0.1. Lieu de la visite : ☐ (Péri)Urbain ☒ Rural

0.2. Adresse du site visité :

☐ Province/Préfecture : *Taroudant*

☐ Commune : *Tizi n'Tast*

☐ Quartier/Douar : *Ighfis*

0.3. Morphologie du site :

☐ Terrain horizontal ☒ Terrain en pente (forte) ☒ Terrain en pente (modérée) ☐ Colline (crête)

0.4. Géologie et géotechnique du site :

☐ Plutôt stable (pas de mouvements) ☒ Plutôt instable (mouvements visibles) ☐ Failles ☐ Ne sait pas

0.5. Environnement du site :

☐ Site inondable (cours d'eau) ☐ Site exposé aux chutes de blocs ☒ Présence d'arbres et végétations

1. Premier niveau du diagnostic : à l'échelle d'un groupement de constructions

1.0. Type de constructions dominant (Indiquer %) :

☐ Maçonnerie de pierre : ☒ Terre (pisé, adobe) : 80% ☒ Béton de ciment : 10% ☒ Mixtes : 10%

1.1. Densité des constructions (occupation du sol) :

☐ Dispersées ☐ Plutôt dispersées ☒ Plutôt groupées ☐ Groupées

1.2. Etat de conservation des constructions :

☐ Intact (invisible) ☒ Effondrement partiel (certaines constructions) ☒ Effondrement (Presque) total

1.3. Estimation du taux des constructions effondrées entièrement (ou presque) :

☐ 0% ☐ 10% ☐ 20% ☐ 30% ☐ 40% ☐ 50% ☐ 60% ☒ 70% ☐ 80% ☐ 90% ☐ 100%

1.4. Type de constructions effondrées entièrement (ou presque) :

☐ Constructions en pierre ☒ Constructions en terre ☐ Constructions en béton de ciment ☒ Constructions mixtes

1.4. Emplacement des constructions entièrement effondrées [à décrire] :

Constructions relativement anciennes et groupées avec murs mitoyens

1.5. Autres renseignements utiles :

Le site du douar est en pente relativement raide plus ou moins aménagée en terrasses, mais sans murs de soutènement. La pierre n'est vraisemblablement pas disponible sur le site. Plusieurs mouvements de terrains sont observés près du site.

2. Deuxième niveau du diagnostic : à l'échelle d'une construction					
2.0. ID du site de la construction : T - TT - IGH 01 (Photo IGH 03 02)					
2.1. Catégorie de la construction :					
☐ Classe I : Importance vitale ☐ Classe II : Grand public ☒ Classe III : Habitation					
2.2. Age de la construction :					
☐ Très ancienne ☒ Relativement ancienne ☒ Relativement récente ☐ Très récente					
2.3. Technique de construction :					
☐ Béton et maçonnerie conventionnelle ☐ Maçonnerie de pierre ☒ Pisé ☐ Adobe ☐ Mixte					
2.4. Niveaux et hauteur :					
☒ Moins de 4 m (un seul niveau). ☐ Moins de 7 m (deux niveaux). ☐ Plus de 7 m (plus de deux niveaux)					
2.5. Sol support de la construction :					
☐ Rocher ☒ Sol ferme ☐ Sol meuble ☐ Sol mou ☐ Autre :					
2.6. Conditions d'implantation :					
☐ Horizontale ☐ Inclinée ☒ En gradin ☒ Soubassement ☐ Chainage ☐ Autres : Terrain protégé par un soutènement					
2.7. Interactions avec les constructions voisines :					
☒ Pas de contact ☒ Joints entre constructions ☐ Contact sans joints ☐ Mur mitoyen (commun)					
2.8. Régularité de la construction en plan :					
☒ Deux axes de symétrie ☐ Un axe de symétrie ☐ Pas de symétrie ☒ Bon rapport Longueur/Largeur					
2.9. Régularité en élévation :					
☒ Plutôt régulière ☐ Plutôt irrégulière ☐ Ne sait pas					
2.10. Système de contreventement :					
☒ Murs simples ☐ Murs chaînés ☐ Portiques ☐ Système mixte ☐ Autres : Murs en pisé					
2.11. Ouvertures dans les murs :					
☒ Respect des principes parasismiques ☐ Non-respect des principes parasismiques					
2.12. Systèmes de renforcements :					
☐ Chainage horizontal en bois ☐ Chainage horizontal en béton ☐ Chainage vertical ☒ Pas de chainage					
2.13. Planchers et toitures :					
☐ Dalle en béton armé ☐ Structure métallique ☒ Structure en bois ☐ Autres : un seul sens de portance					
2.14. Qualité des matériaux de construction :					
☒ Bonne ☐ Moyenne ☐ Mauvaise ☐ Ne sait pas					
2.15. Qualité de mise en œuvre :					
☐ Bonne ☒ Moyenne ☐ Mauvaise ☐ Ne sait pas					
2.16. Entretien de la construction :					
☐ Suffisant ☒ Insuffisant ☐ Ne sait pas					
2.17. Etat de conservation de la structure porteuse :					
Etendue dommages →	D5 : Destruction	D4 : Très graves	D3 : Importants	D2 : Moyens	D1 : Légers
Structure verticale					☒
Structure horizontale					☒
Connections			☒ (une direction)		
Appréciation global					☒
2.18. Etat de conservation de la structure non porteuse :					
Présence dommages →	Oui	Non	Description sommaire des dommages constatés		
Murs non porteurs et cloisons			Tous les murs sont porteurs		
Eléments de menuiserie		☒	Pas de dommages		
Ouvrages de finition			Aucun ouvrage visible de l'extérieur		
Appréciation global	Dommages négligeables				

Annexe C : Proposition d'un planning général pour la reconstruction

PROPOSITION DE PLANNING ENVELOPPE POUR LA RECONSTRUCTION															
N°	PHASES PRINCIPALES	RESSOURCES	DUREE	2023			2024								
				M10	M11	M12	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09
A	Choix et validation des sites de construction	Sismologue, géologues, géotechniciens	2												
B	Sites et constructions à réhabiliter	Maitre d'ouvrage : Services publics	2												
B1	Recensement et identification des constructions à conserver en vue de réhabilitation	Services publics													
B2	Protection et réhabilitation provisoire des constructions identifier	Populations et propriétaires													
B3	Nettoyage et réhabilitation sommaire des sites conservés	Services publics, Entreprise													
C	Stabilisation des terrains de construction	Maitre d'ouvrage : Services publics	3												
C1	Etude et expertise de la stabilité géologique et géotechniques des sites de construction	Géologues, Ingénieurs géotechniciens	1												
C2	Travaux de terrassement en vue stabilisation des terrains	Entreprises terrassement	1												
C3	Travaux de construction des ouvrages de soutènement de stabilisation des sites	Entreprises, Coopératives locales	1												
D	Aménagement des sites et préparation de la reconstruction	Maitre d'ouvrage : Services publics	3												
D1	Etude d'aménagement et de viabilisation des sites de construction	Topographes, Urbanistes, Architectes, Ingénieurs	1												
D2	Travaux d'aménagement et de viabilisation des sites de construction	Entreprises travaux	2												
D3	Sensibilisation des populations et formation des compétences	Ministères et services publics	2												
E	Conception des nouvelles constructions et Réhabilitation des constructions conservées	Maitre d'ouvrage : Propriétaires	2												
E1	Reconnaissance des sols de construction	Ingénieur géotechnicien, Laboratoire	1												
E1	Diagnostic au cas par cas et réhabilitation permanente des constructions conservées	Architecte, Ingénieurs spécialisés	1												
E2	Etude et conception des nouvelles constructions à réaliser	Architecte, Ingénieurs spécialisés	1												
F	Construction et Auto-construction avec assistance technique	Maitre d'ouvrage : Propriétaires	7												
F0	Communication des plans d'exécution aux propriétaires et implantation	Architecte, Bureau d'Etudes	1												
F1	Implantation et traçage des limites de terrassement	Topographe	1												
F2	Terrassement pour fondations réception du sol support	Architecte, Bureau d'Etudes	1												
F3	Formulation, élaboration et réception des matériaux et matériel de construction	Architecte, Bureau d'Etudes, Laboratoire	1												
F4	Exécution et réception des fondations et du soubassement	Architecte, Bureau d'Etudes	1												
F5	Exécution et réception des murs et des ouvrages en élévation	Architecte, Bureau d'Etudes	3												
F6	Exécution et réception de la structure du plancher haut	Architecte, Bureau d'Etudes	1												
F7	Exécution et réception des ouvrages non porteurs et des ouvrages de finition	Architecte, Bureau d'Etudes	1												
Observations :															
- Les phases "C" à "D" sont à gérer en parallèle de manière à assurer leur cohérence															
- Les tâches "F5" à "F6" sont à répéter selon le nombre de niveaux															
- Après chacune des tâches "F1" à "F7" les concernés devront recevoir une partie de l'aide à la reconstruction															
- En ce qui concerne la phase "E", les services publics peuvent jouer le rôle de maitre d'ouvrage délégué															

Annexe D : Exemples de constructions entièrement en matériaux locaux























