



Vulnérabilité sismique des constructions en pisé

Etude expérimentale et modélisation

Ophélie MOTTIER

VA Génie Civil

Promotion 52

Juin 2007

Président de jury

Maître de stage

Tuteur

Expert

M. Claude-Henri Lamarque

M. Jean-Claude Morel

M. Stéphane Hans

M. Michaël Dierkens

Notice analytique

Auteur	Ophélie MOTTIER
Sujet	Vulnérabilité sismique des construction en pisé, Etude expérimentale et modélisation.
Maître de stage	Jean-Claude MOREL
Tuteur de stage	Stéphane HANS
Organisme	Laboratoire GéoMatériaux de l'ENTPE à Vaulx-en-Velin
Résumé	<p>Dans une région sismique, les savoir-faire constructifs ancestraux sont souvent perdus par manque de transmission ou de connaissances scientifiques qui les valident. Analyser diverses cultures sismiques locales permet de mettre en avant un certain nombre de systèmes constructifs performants sous séisme. Ce Travail de Fin d'Etudes propose, via une étude bibliographique, de recenser quelques unes de ces techniques qui protègent. En ce restreignant au matériau pisé décrit dans le chapitre un et encore mal connu, un essai de compression simple montre qu'il est possible de définir un module élastique pour ce matériau mais qu'il varie avec le niveau de contrainte appliqué. Cela complique la modélisation d'une structure sous séisme et le traitement d'un essai dynamique in situ permet, pour un cas particulier, de caractériser le matériau pisé in situ. Enfin, l'orthotropie du matériau à moindre échelle est prise en compte via une étude théorique de l'homogénéisation des matériaux périodiques constitués de plusieurs couches et des essais dynamiques en laboratoire.</p>
Abstract	<p>In a seismic area, ancestral constructive know-how is often lost for lack of transmission or scientific knowledge which validates them. Analyzing various local seismic cultures enables to propose some powerful constructive systems under seism. This work proposes, via a literature review, to count some of these protective techniques. Within the limits of the rammed earth described in chapter one and still little known, an unconfined compression test shows that it is possible to define an elastic modulus for this material but that it varies with the applied pressure level. That complicates the modeling of a structure under seism and the treatment of a dynamic test in situ allows, for a particular case, to characterize the rammed earth material in situ. Finally, on less scale, the orthotropism of rammed earth is taken into account by a theoretical study of several layers periodic materials and their homogénéisation and dynamic tests in laboratory.</p>

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à MM. Jean-Claude Morel et Stéphane Hans pour leur encadrement, leurs nombreux conseils et leur soutien constant tout au long de mon TFE.

Je remercie MM. Claude-Henri Lamarque et Michaël Dierkens, le président de mon jury et mon expert, pour avoir accepté de tenir ces rôles.

Je tiens particulièrement à remercier M. Ferruccio Ferrigni pour tous ses précieux conseils. J'ai beaucoup appris sur les cultures sismiques locales en lisant quelques unes de ses parutions.

Un grand merci à M. Nicolas Meunier d'avoir consacré un peu de son temps à la réalisation des échantillons de pisé ainsi que pour sa bonne humeur et sa passion communicative.

Je remercie MM. Quoc-Bao Bui et Sébastien Courier pour leur indispensable aide pendant ces trois mois de TFE.

Je tiens à témoigner tout particulièrement ma sympathie et ma reconnaissance à Mme. Titane Galer pour sa disponibilité et son accueil chaleureux dans les locaux de CRATerre quand j'ai eu à consulter leur bibliothèque. Merci aussi à M. Olivier Moles pour son invitation à participer à un cours à l'école d'architecture de Grenoble et pour ses références précieuses.

Enfin, je termine par un grand remerciement à mon fiancé et à mes amis pour leur soutien inconditionnel.

Table des matières

Introduction générale	11
Qu'est-ce que le pisé ?	11
Une problématique plus générale	11
La démarche adoptée	12
1 La terre banchée ou pisé	13
1.1 Terre crue, terre cuite, généralités	13
1.2 Le pisé	13
1.2.1 Ses avantages	13
1.2.2 Ses limites	15
1.3 Le patrimoine en zone sismique	16
2 Le bâti vernaculaire en zone sismique	19
2.1 La dynamique et les séismes	20
2.1.1 Généralités	20
2.1.2 Les énergies mises en jeu	20
2.1.3 Les approches parasismiques	22
2.2 La vulnérabilité du point de vue des cultures sismiques locales	22
2.2.1 Les enjeux	23
2.2.2 La naissance d'une culture sismique locale	24
2.2.3 Les reconnaître, les utiliser	24
2.3 Les connaissances empiriques tirées de l'observation	26
2.3.1 En amont, si possible...	26
2.3.2 Les techniques de renforcement relevées sur le bâti ancien	26
2.3.3 Les principales causes de vulnérabilité	30
2.3.4 Conclusion	31
3 Quelques expérimentations	33
3.1 Protocole expérimental	33
3.1.1 Réalisation des échantillons	35
3.1.2 Essai de compression simple	35
3.1.3 Mesures dynamiques in-situ sur un mur en L	39
3.2 Traitement des mesures	40

3.3	Modélisation	44
3.3.1	Modélisation éléments finis sous CESAR	44
3.3.2	Théorie des poutres de Timoshenko	45
3.4	Conclusion	50
4	Théorie de l'homogénéisation et modèle en couche	53
4.1	Essais dynamiques en laboratoire	53
4.2	Homogénéisation d'un milieu stratifié	54
4.2.1	Homogénéisation dans le cas général	54
4.2.2	Conséquences de la stratification plane	57
4.2.3	Constituants isotropes	57
4.3	Confrontation des résultats	60
4.3.1	Application du développement précédent à un échantillon de pisé	60
4.3.2	Modélisation sous Cesar de l'échantillon	64
4.3.3	Conclusion	67
5	Essais exploratoires sur une maison en pisé	69
5.1	Description de la maison	69
5.2	Protocole expérimental et conditions de mesures	69
5.3	Analyse succincte des résultats obtenus	69
5.4	Conclusion	74
	Conclusion générale	75
	Le travail effectué	75
	La suite à donner	76
A	L'utilisation de la terre crue	77
B	Quelques compléments de sismologie	79
C	Photos de la réalisation des échantillons de pisé	81
D	Programme Matlab utilisé pour la transformation en ondelettes	87
E	Séquence Maple pour le calcul des fréquences propres du mur en L	89

Table des figures

1.1	Echantillon de pisé réalisé par Nicolas Meunier	14
1.2	Carte de l'aléa sismique et des zones de constructions en pisé et en bauge	16
2.1	Caractéristiques d'un séisme	21
2.2	Bilan énergétique lors d'un séisme	21
2.3	Répartition schématique de l'énergie incidente dans les deux approches précédentes	23
2.4	Niveau de la culture sismique locale en fonction du temps pour moins de deux séismes par génération, d'après [6]	25
2.5	Niveau de la culture sismique locale en fonction du temps pour plus de deux séismes par génération, d'après [6]	25
2.6	Eglise consolidée par un contrefort suite à un tremblement de terre (Photo A. Laurenti, Azurséisme)	27
2.7	Illustration, une vieille rue de Peille, Alpes-Maritimes (Médiathèque de l'architecture et du patrimoine)	28
2.8	Portique dans une ruelle dans le sud de l'Italie (vacanceo.com)	28
2.9	Maison du Salvador (Photo R. Langenbach)	29
2.10	Exemple de fissures entre ouvertures trop proches	30
3.1	Photos du mur en L testé par le LGM	34
3.2	Echantillon de pisé sur la presse	36
3.3	Diagramme contrainte / déformation issu de l'essai de compression simple avec trois cycles de charge / décharge	37
3.4	Diagramme contrainte / déformation, premier cycle de charge / décharge	37
3.5	Diagramme contrainte / déformation, deuxième cycle de charge / décharge	38
3.6	Diagramme contrainte / déformation, troisième cycle de charge / décharge	38
3.7	Dimensions du mur étudié ; vue en plan et vue en élévation	39
3.8	Localisation des capteurs et des chocs ; vue en plan	40
3.9	Choc 1 : Transformés en ondelettes de la réponse du mur enregistré par les différents capteurs	41
3.10	Choc 2 : Transformés en ondelettes de la réponse du mur enregistré par les différents capteurs	42

3.11	Choc 3 : Transformés en ondelettes de la réponse du mur enregistré par les différents capteurs	43
3.12	Maillage du mur étudié sous CESAR	44
3.13	Evolution des fréquences propres du mur en L calculées sous CESAR en fonction de E	45
3.14	Exemples de déformées propres du mur en L obtenues avec CESAR	46
3.15	Poutre de Timoshenko	47
3.16	Evolution des paramètres delta en fonction de C pour les deux premiers modes	49
3.17	Evolution des fréquences issues de la théorie de Timoshenko pour les deux inerties I_y et I_z	49
4.1	Vélocimètre posé sur le haut de l'échantillon	53
4.2	Signal correspondant à un choc horizontal au sommet de l'échantillon	54
4.3	Transformés en ondelettes de la réponse de l'échantillon selon les trois directions	55
4.4	Schéma d'un milieu composé de couches planes	56
4.5	Première approche : variation linéaire de E sur la hauteur d'une couche	61
4.6	Exemples de déformées propres des échantillons obtenues avec CESAR pour une modélisation isotrope	65
4.7	Evolution des fréquences propres des échantillons calculées sous CESAR en fonction de E pour un matériau isotrope	65
4.8	Evolution des ratios de fréquences pour un matériau isotrope	66
4.9	Exemples de déformées propres des échantillons obtenues avec CESAR pour une modélisation orthotrope	66
5.1	Vue de côté de la maison	70
5.2	Vue de la facade de la maison	70
5.3	Vélocimètre posé au rez-de-chaussée de la maison	71
5.4	Schéma de la maison avec la direction Nord - Sud des appareils de mesure	71
5.5	Graphe fréquences-déformations dans la direction Nord-Sud	72
5.6	Graphe fréquences-déformations dans la direction Est-Ouest	72
5.7	Graphe fréquences-déformations dans les 2 directions horizontales à l'étage	73
5.8	Réglementation	73
A.1	Diagramme des utilisations de la terre crue, d'après [5]	77
B.1	Les différents types d'ondes	79
C.1	Coffrage des échantillons	81
C.2	Système hydraulique de la dame	82
C.3	Réglage de la pression de la dame	82
C.4	Réalisation d'une couche	83
C.5	Opérations de décoffrage	84
C.6	Echantillons décoffrés	85

Introduction générale

Qu'est-ce que le pisé ?

Le pisé est un matériau de construction réalisé par le compactage de terre crue dans un coffrage. Produit d'une technique quasi-ancestrale, les habitations en pisé sont très présentes en Europe et notamment en France. Pourtant, actuellement, aucune réglementation parasismique ne concerne ce type de construction.

Le pisé n'est pas un matériau industriel. Ses performances mécaniques ne sont pas très élevées car il ne résiste pas à la traction et sa résistance à la compression est faible (environ 50 fois moins que le béton). Cependant, une mise en œuvre appropriée permet de palier ce type de problème.

D'un autre côté, étant donné son impact sur l'environnement très faible, le pisé est un matériau de construction performant en terme de développement durable. Malgré les enjeux qu'il représente : habitat sain, préservation du patrimoine, confort hygrométrique, développement de l'artisanat, il ne fait actuellement l'objet d'aucune règle de calcul officielle appropriée, ce qui a pour effet de limiter son développement.

Une problématique plus générale

Le pisé n'est pas le seul matériau disponible localement, peu industrialisé et à faible résistance mécanique en traction. Il existe d'autres matériaux de construction qui s'inscrivent dans la même problématique, principalement les maçonneries de pierres sèches ou d'adobes (bloc de terre crue moulée et séchée).

L'absence de connaissances scientifiques pose problème en ce qui concerne la gestion et le développement du patrimoine en pisé (ou tout autre type de matériau non industriel) dans les zones sismiques. En effet, les connaissances nécessaires pour réglementer ce type de construction sont quasi inexistantes alors même que les enjeux liés à ce matériau sont multiples, [2] : préservation du patrimoine, sécurité, construction de logements dans le cadre d'un développement durable. Dans une problématique européenne de conservation du patrimoine, l'observation des constructions en matériaux locaux en zones sismiques ou plus généralement appelées les cultures sismiques locales (LSC : Local Seismic Culture) ont déjà permis, au Centre Universitaire Européen pour les Biens Culturels de Ravello en Italie, [6], de développer différentes méthodes d'interventions post-catastrophes. Cependant, ces interventions, comme leur nom l'indique,

n'arrivent qu'après la catastrophe c'est-à-dire trop tard pour sauver des vies. Utiliser un matériau alternatif au béton est intéressant mais ne doit pas se faire au détriment de la sécurité. Comment savoir si ces constructions peuvent assurer la sécurité de ses occupants durant un séisme ?

Dans le contexte mondial, les pays en développement sont sans moyens financiers et sans maîtrise de la construction en matériaux industriels, la seule alternative est alors l'utilisation des matériaux locaux pour la construction neuve ou la reconstruction après une catastrophe comme cela a été le cas après le séisme du 8 octobre 2005 au Pakistan.

La démarche adoptée

A partir de l'étude de différentes cultures sismiques locales et des systèmes constructifs parasismiques performants, je me suis focalisée sur le matériau pisé et sur ses propriétés. Il s'agit de commencer par décrire le comportement du pisé seul en statique, première étape avant les LSC, pour ensuite pouvoir extrapoler en sismique (méthode de dimensionnement actuelle).

Une première partie décrivant le matériau pisé, ses avantages et ses inconvénients sera suivie par un chapitre sur le bâti vernaculaire en zone sismique et les enseignements qu'on peut en tirer par l'approche des LSC, développée par le CUECB de Ravello. Un chapitre est ensuite consacré à la description des premières expérimentations effectuées sur le matériau pisé afin de caractériser son comportement : essai de compression simple et essais dynamiques in-situ. Enfin, la dernière partie traite de la théorie de l'homogénéisation sur un matériau périodique en couche et de l'application des résultats sur les échantillons testés dynamiquement en laboratoire.

Chapitre 1

La terre banchée ou pisé

1.1 Terre crue, terre cuite, généralités

Il existe deux sortes de terre différentes utilisées dans la construction : la terre crue et la terre cuite.

La **terre crue** est composée d'un mélange aux pourcentages variables d'éléments fins (argile, limons) et d'agrégats (sables, graviers). Elle est utilisée dans son état naturel pour les techniques de construction du torchis, de la bauge, de l'adobe et du pisé, entre autres.

La **terre cuite** est réalisée à base de terre très argileuse et riche en composants siliceux et alumineux. La cuisson de cette terre induit une stabilisation irréversible. Les briques de terre cuite ou les tuiles sont issues d'une telle transformation.

Il ne sera question ici que de terre crue dont les divers usages sont référencés, d'après [5], à l'annexe A.1 et plus précisément du pisé, [3].

1.2 Le pisé

Les murs en pisé (Fig. 1.1) sont réalisés avec de la terre placée dans un coffrage (ou banchage) puis compactée de façon manuelle ou pneumatique pour former des lits de 10 à 15 cm de haut environ. Ces murs d'épaisseur variant entre 30 à 45 cm, sont souvent construits avec un fruit pour en assurer une plus grande stabilité. Les angles peuvent être renforcés par des lits de chaux successifs, des maçonneries de briques ou des bois noyés dans le mur.

1.2.1 Ses avantages

Matériau durable

Le matériau pisé est un matériau durable pour plusieurs raisons :

- sa mise en œuvre nécessite une faible dépense d'énergie et donc limite les rejets de polluants,



FIG. 1.1 – Echantillon de pisé réalisé par Nicolas Meunier

- il est réutilisable et recyclable sans traitement particulier,
- le matériau de base est abondant et disponible in-situ.

Modes architecturaux divers

La flexibilité des modes architecturaux est grande. En effet, il existe une grande variété de textures et de couleurs pour ce matériau ainsi que diverses formes de construction possibles.

Confort intérieur et santé

Les argiles présentes dans les murs absorbent les moisissures et régulent l'humidité intérieure augmentant le confort hygrothermique et la qualité de l'air dans le bâti, [4]. Cette régulation permet aussi d'assurer une plus grande durabilité du bâti.

Performances des matériaux à base de terre

Les performances mécaniques du pisé, bien que faibles en traction et en compression, permettent tout de même de construire des immeubles de cinq étages.

Vitesse de construction

Enfin, la durée de construction est relativement limitée du fait de la présence sur site des matériaux nécessaires et de la simplicité de construction.

1.2.2 Ses limites

Durabilité en présence d'eau

La durabilité du matériau est réduite en présence d'eau. La mise hors d'eau est assurée par un sous-bassement en pierre (ou autre), éventuellement une avancée de toit et l'utilisation d'enduit mural. Cependant, en raison de la méconnaissance du matériau, il est assez répandu de rencontrer des protections extérieures non pertinentes (à base de ciment, par exemple) qui imperméabilisent la surface du pisé, emprisonnant l'eau à l'intérieur. Ceci provoque des pathologies graves dues à la diminution des caractéristiques mécaniques et qui peuvent aboutir à l'effondrement de la structure. Le pisé doit "respirer" afin de pouvoir réguler la proportion d'eau dans les murs. Si un enduit est utilisé, il doit impérativement permettre à cette eau de s'échapper.

Epaisseur des murs

Le pisé étant très peu résistant à la traction, l'épaisseur des murs doit être assez importante afin d'assurer la stabilité de ces murs vis-à-vis des forces horizontales issues des légères excentricités des efforts verticaux. La résistance mécanique d'une maison sous son propre poids se trouve ainsi améliorée.

Comportement thermique

Les qualités d'isolation du matériau sont loin d'être excellentes car il s'agit d'un matériau particulièrement dense. Afin de répondre aux exigences actuelles en matière de régulation thermique, des matériaux isolants supplémentaires doivent être utilisés augmentant alors le coût de construction.

Cependant, une connaissance approfondie de la thermique du pisé permet souvent de n'isoler que les murs nord pour conserver un très bon confort thermique d'été (identique à celui des maisons anciennes).

Sélection de la terre

Tous les sols ne conviennent pas à la construction en pisé. Seuls les sous-sols avec des proportions d'argile et de granulats adéquats sont utilisés. On peut améliorer la qualité d'un sol en mélangeant plusieurs terres par exemple, ce qui n'est pas forcément évident à réaliser en pratique.

Construction in-situ

Le stockage du matériau terre et des équipements nécessite beaucoup de place. De plus, les murs non terminés doivent être protégés des intempéries et l'humidité de la terre stockée contrôlée.

1.3 Le patrimoine en zone sismique

En France, le nombre de logements en pisé est estimé à 500 000, d'après [1]. Un zonage grossier des constructions en pisé et en bauge¹ peut-être réalisé à partir de cette étude. Il est représenté sur la nouvelle carte de l'aléa sismique de 2005 à la figure 1.2.

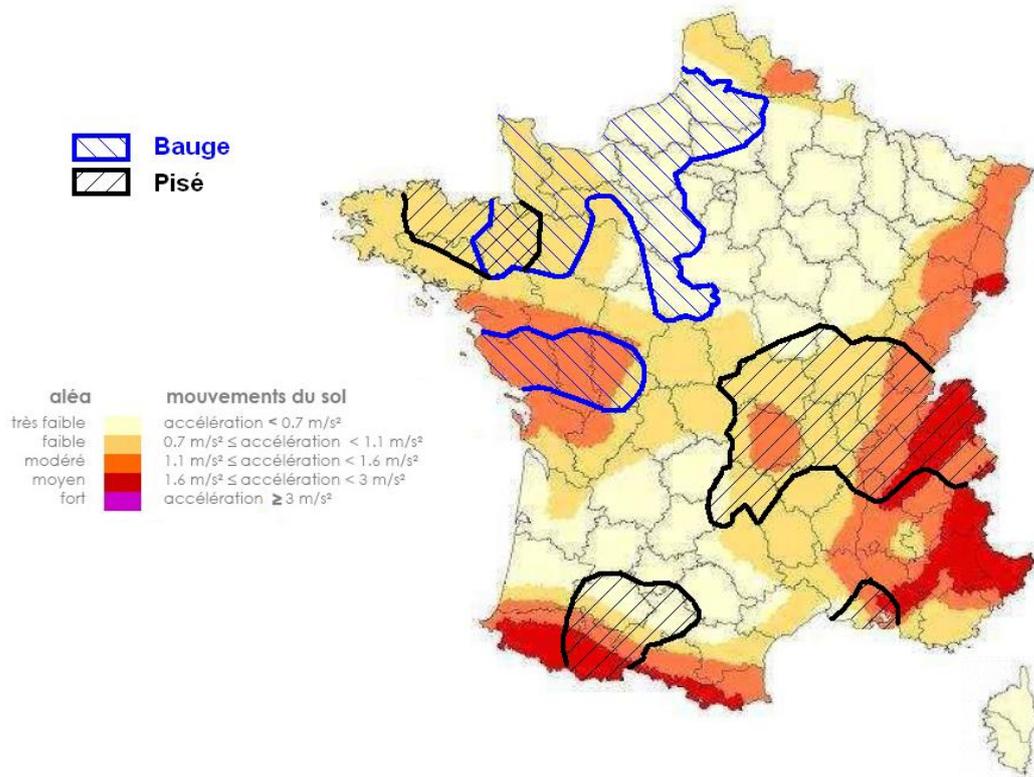


FIG. 1.2 – Carte de l'aléa sismique et des zones de constructions en pisé et en bauge

Les constructions en terre sont également répandues à travers le monde. Le pisé est très répandu au Maroc, dans les contreforts de l'Himalaya, en Chine, en Amérique du sud. Il y est toujours utilisé sous des formes traditionnelles. La technique connaît du succès dans des utilisations contemporaines en Australie, dans le sud-ouest des USA,

¹La bauge est un système constructif monolithique en terre crue empilée. La terre mélangée à des fibres végétales (paille) ou animales, est mise en place à l'état plasique.

ainsi qu'en Allemagne, Suisse et Autriche. Bien évidemment, il n'est pas possible de faire un recensement précis des bâtiments en pisé de part le monde.

La réglementation parasismique actuelle ne permet pas d'agir efficacement sur le patrimoine existant car les normes sont adaptées et rédigées pour l'utilisation de matériaux industriels qui acceptent des niveaux de contraintes plus élevés. Leur application peut même, être destructive pour le bâti ancien, [6].

Quelle démarche adopter alors pour évaluer la vulnérabilité sismique d'un bâtiment en pisé et éventuellement agir en conséquence? Etudier les cultures sismiques locales et les techniques ancestrales de constructions parasismiques nous permet de garder vivace ou de retrouver des mises en oeuvre parasismiques performantes même pour un matériau aux performances mécaniques peu élevées et servirait de base à une étude plus approfondie. L'objectif serait donc de comprendre les mécanismes en oeuvre dans ces techniques afin d'une part de les valider et d'autre part d'en améliorer l'utilisation.

Chapitre 2

Le bâti vernaculaire en zone sismique

Lors des opérations de reconstruction post-séisme, les initiatives nouvelles ont souvent la part belle. Ainsi, nombre de savoir-faire constructifs en région sismique se perdent, [6]. Cependant, les modes constructifs industrialisés sont souvent peu adaptés à une région sismique en développement, tant au point de vue social, technique, culturel et environnemental .

Les maisons individuelles ne sont pas sujettes à la même attention que le patrimoine protégé lors des renforcements ou des réhabilitations. Malheureusement, les réglementations parasismiques ne sont pas adaptés aux matériaux du bâti vernaculaire car ils répondent à la problématique des matériaux industrialisés comme le béton armé ou l'acier qui, contrairement aux matériaux locaux comme la terre, sont bien connus et résistent à des contraintes de traction élevées. Une mise en oeuvre intelligente permet de palier ce problème de faible résistance mécanique mais nécessite de connaître les modes constructifs ou les techniques de renforcement qui seront les plus performants en un lieu.

C'est le but de l'étude des cultures sismiques locales, développée dans [6]. Dans une zone géographique, l'observation et l'analyse de la culture sismique permet de rattraper les savoir-faire et les techniques perdues par un manque de transmission orale, par exemple. Il s'agit d'apprendre du patrimoine afin de protéger le bâti ancien et d'être en mesure de proposer des solutions d'habitat économique dans la zone étudiée.

Le terme "culture" signifie que de nombreux aspects sont imbriqués dans la construction et la conservation du bâti vernaculaire. Une culture sismique locale dépend donc de la géographie, de la géologie, des usagers, du climat, de l'histoire,... du lieu étudié. Nous n'aborderons ici que le point de vue de l'ingénieur, tout en gardant à l'esprit qu'une approche pluridisciplinaire est nécessaire. Des contacts avec MM. Ferruccio Ferrigni, Olivier Moles et Nicolas Meunier ont d'ailleurs été pris dans cette optique.

2.1 La dynamique et les séismes

Dans cette première partie, après quelques généralités sur les séismes, sont décrites les différentes énergies entrant en jeu lors d'un tremblement de terre. Le bilan énergétique d'un bâti permet de définir des stratégies de construction parasismique et ces dernières se retrouvent dans la façon dont les populations locales ont répondu aux séismes répétés.

2.1.1 Généralités

Un tremblement de terre est le résultat d'une brusque libération d'énergie suite au déplacement et à la friction de différentes parties de la croûte terrestre. Le point d'origine du séisme est appelé hypocentre ou foyer. Le point correspondant à la surface terrestre est l'épicentre.

Le relâchement brutal des contraintes se localise le plus souvent sur une faille mais il peut aussi être d'origine volcanique. Il génère des ondes volumiques et des ondes de surface.

La puissance d'un séisme est quantifiée par la magnitude. Il s'agit d'une mesure à échelle logarithmique de l'amplitude du mouvement et donc de l'énergie libérée lors du séisme. Plusieurs magnitudes différentes peuvent être calculées (magnitude locale, de durée, des ondes de surfaces,...). Il ne faut pas confondre magnitude et intensité. Cette dernière résulte de l'observation des effets et des conséquences d'un tremblement de terre dans un lieu donné. Elle décroît quand on s'éloigne de l'épicentre mais peut être amplifiée par des effets de site.

Des précisions sont données en annexe B.

2.1.2 Les énergies mises en jeu

Lors d'un séisme, une énergie est libérée et est transmise au bâtiment par le sol. Cette énergie absorbée, E_i induit des mouvements et des déformations dans la structure. Elle est transformée en énergie cinétique, E_c , en énergie de déformation élastique, E_{def} et en énergie dissipée, E_d .

Comme représenté sur la figure 2.2, le bilan énergétique pour le bâtiment est :

$$E_i = E_c + E_{def} + E_d$$

L'énergie E_d est, comme son nom l'indique, perdue et elle se décompose en deux : une partie est dissipée lors de la déformation plastique de la structure qui reste dans son domaine non-destructif et l'autre partie cause des dégâts au bâti.

Schématiquement, l'énergie incidente, qui est proportionnelle à la masse du bâti et au mouvement du sol, est transformée :

- en énergie absorbée lors de la déformation plastique qui regroupe E_c , proportionnelle à la masse du bâtiment, et E_{def} , proportionnelle à la rigidité de la structure,
- en énergie dissipée lors de la déformation plastique,
- en énergie causant des dégâts.

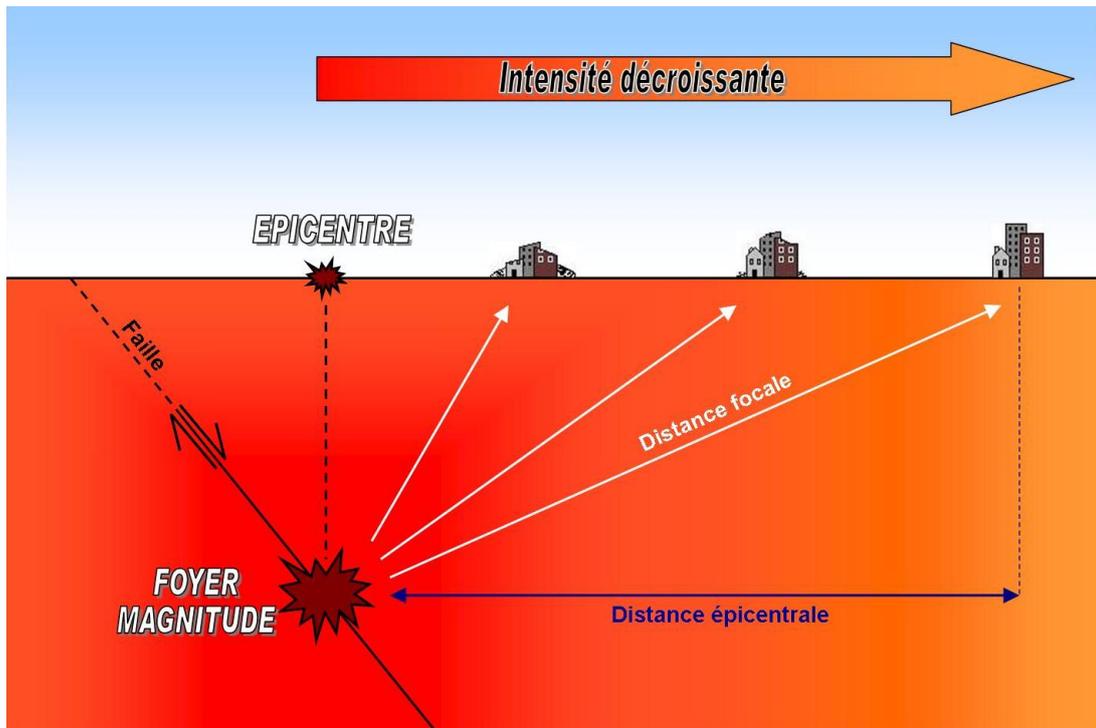


FIG. 2.1 – Caractéristiques d'un séisme

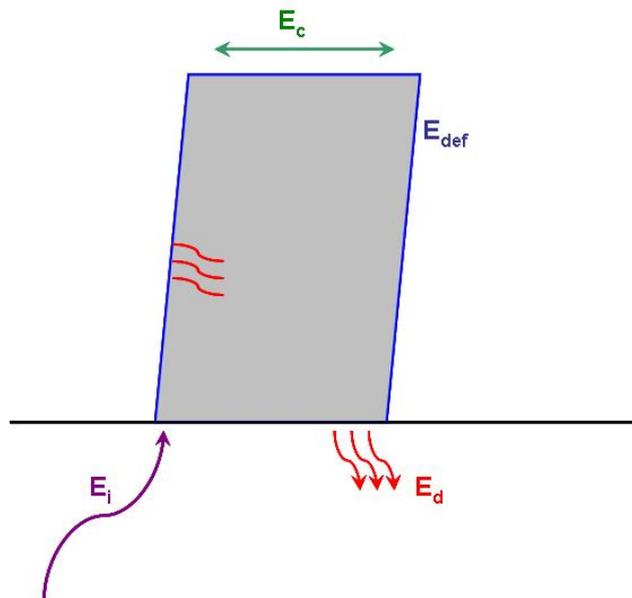


FIG. 2.2 – Bilan énergétique lors d'un séisme

2.1.3 Les approches parasismiques

Partant de ces acquis physiques, plusieurs stratégies de conception parasismique émergent. Les deux stratégies couramment utilisées sont schématisées à la figure 2.3.

L'approche par le domaine élastique

Elle consiste à améliorer la résistance de la structure en augmentant la résistance des éléments c'est-à-dire la masse et la raideur. Par exemple, l'épaisseur des murs peut être augmentée. Le but de cette approche est de faire en sorte que la structure résiste tout en restant dans son domaine élastique (domaine connu). On augmente la capacité de la structure à stocker l'énergie transmise sous forme d'énergie cinétique et de déformation élastique dans les éléments de structure. Ceci nécessite une rigidité homogène dans la structure et donc une rigidité de chaque élément importante.

L'avantage de cette approche est bien sûr, de faciliter la modélisation de la construction puisqu'elle reste dans son domaine élastique. Malheureusement, les matériaux utilisés doivent posséder une capacité de haute résistance et ne sont pas disponibles partout. De plus, la masse du bâtiment augmente, amplifiant ainsi l'énergie incidente.

L'approche par dissipation

Elle consiste à accepter une réponse plastique du bâti, afin d'augmenter le potentiel de dissipation de l'énergie de déformation plastique. Lors de cette réponse plastique, l'énergie est dispersée dans la friction entre éléments (ex : bois sur maçonnerie). Les déformations sont libres mais ne doivent pas endommager la structure. Ainsi, pour que la construction reste stable, un haut degré hyperstatique est nécessaire.

Evidemment, dans une telle approche, le comportement structurel est difficile à modéliser car aucun standard n'existe. Par contre, les résultats sont bons et les cultures sismiques locales en sont la preuve.

Autres stratégies

Lors de la conception du bâtiment, on peut tenter de minimiser les charges sismiques afin de réduire l'énergie transmise à la structure lors d'un séisme. L'action sismique se traduit par une force d'inertie appliquée au bâti qui est proportionnelle à la masse du bâtiment et à l'accélération imposée. Il est donc possible de réduire ces charges sismiques en minimisant la masse du bâti et / ou en minimisant l'accélération imposée en évitant les terrains à effet de site ou la résonance de la structure avec le sol par exemple.

2.2 La vulnérabilité du point de vue des cultures sismiques locales

Cette approche est développée par le Centre Universitaire Européen pour les Biens Culturels de Ravello, CUEBC, [6].

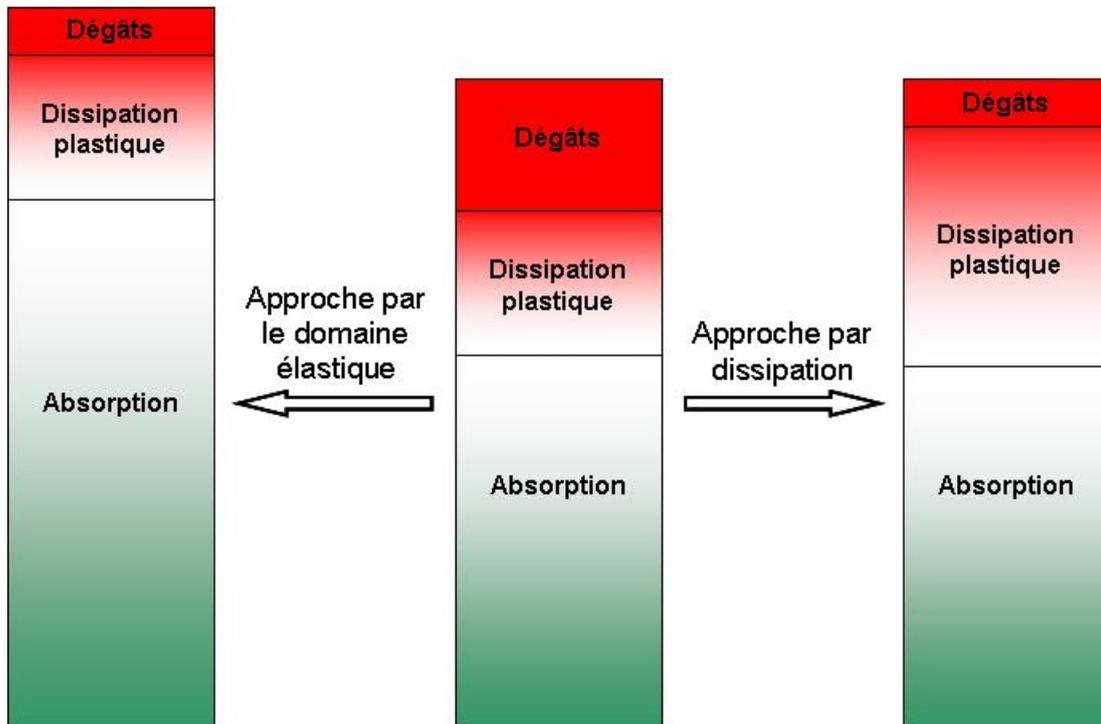


FIG. 2.3 – Répartition schématique de l'énergie incidente dans les deux approches précédentes

2.2.1 Les enjeux

Dans des zones où le risque sismique est important, l'enracinement de techniques constructives parasismiques est remarquable. Les bâtiments classés et les ouvrages d'art portent souvent les signes de ces techniques qu'il est facile de retrouver car l'entretien de ces monuments est permanent.

Malheureusement, le bâti vernaculaire ne bénéficie pas d'une telle attention en matière d'entretien ou de réhabilitation. Dans les pays industrialisés, le regain d'intérêt pour le patrimoine culturel ancien peut permettre, dans une zone, de conserver les techniques parasismiques vivaces. Dans les pays en développement, la perte des savoir-faire est plus brutale. En effet, les modifications du bâti se font sans respect pour les techniques anciennes ce qui peut fragiliser les bâtiments et conduire à sous-évaluer le risque et la vulnérabilité d'un bâti.

Enfin, plutôt que d'imposer des techniques industrielles éventuellement mal maîtrisées sur le site, connaître les techniques locales permet de reconstruire ou d'intervenir sur le bâti en accord avec le contexte économique, social et culturel du lieu.

2.2.2 La naissance d'une culture sismique locale

Dans une zone sismique, il semble évident qu'un simple tremblement de terre ne donne pas naissance à une culture sismique. Plusieurs conditions doivent être réunies.

En effet, si un séisme est trop violent, un grand nombre de bâtiments seront détruits. Comment reconnaître alors les savoir-faire efficaces pour des tremblements de terre moindres ? De plus, il est fort probable que les personnes possédant ces savoir-faire aient péri lors du séisme. A l'inverse, des séismes trop faibles ne génèrent pas suffisamment de dégâts pour que des techniques parasismiques émergent. Outre l'intensité, la récurrence des tremblements de terre influe sur la formation d'une culture sismique locale. Si l'occurrence des séismes est trop faible dans une zone, les techniques parasismiques sont progressivement oubliées car leur utilité n'est pas assez prouvée (Fig. 2.4). Entre deux tremblements de terre, il faut que la population puisse, à partir des dégâts observés, déduire un certain nombre d'idées et les mettre en oeuvre, le séisme suivant permettant de vérifier ces idées.

Ainsi, une culture sismique locale ne peut naître que si, au moins, deux séismes d'intensité forte mais pas catastrophique frappent chaque génération (Fig. 2.5).

Si les séismes sont assez rapprochés, les techniques parasismiques peuvent être améliorées après chaque tremblement de terre, et la population finit par les adopter. Les rajouts de renforcement par exemple, deviennent automatique dans la construction directe. Dans ce cas, la culture sismique est dite culture sismique de prévention. Si l'occurrence sismique est moins élevée, la culture sismique est qualifiée de culture sismique de la réparation car les connaissances parasismiques ne sont pas assez sollicitées pour rentrer dans l'usage, mais sont toutefois utiles lors des interventions post-sismiques.

2.2.3 Les reconnaître, les utiliser

Le travail nécessaire à la récupération de techniques parasismiques traditionnelles est très important et nécessite d'y être formé. La connaissance de l'architecture, de la pathologie des structures, de l'histoire, de l'histoire sismique, de l'urbanisme, de la géographie de la zone étudiée est indispensable ainsi que la participation de la population locale car toutes les informations historiques ne sont pas forcément référencées.

Récupérer une culture sismique locale, peut permettre de prévenir plus efficacement les conséquences désastreuses d'un séisme, d'agir plus efficacement après une catastrophe et de remettre en état le bâti ancien de façon cohérente.

En terme de protection sismique, l'approche actuelle consiste, à partir de l'histoire sismique d'un lieu, à construire des modèles physiques applicables aux bâtiments neufs dont on maîtrise les matériaux et la structure. Ces connaissances parasismiques sont alors appliquées telles quelles au bâti ancien malgré les incohérences qui peuvent en résulter.

L'approche du CUECB se base sur l'histoire des dégâts et des réparations correspondantes. A partir de ce que les populations ont fait, en filtrant ces actions suivant ce qui est ou non réalisable à l'heure actuelle et en les croisant avec certains modèles de calcul actuels, il est possible de déduire des actions pertinentes pour réduire la vulnérabilité

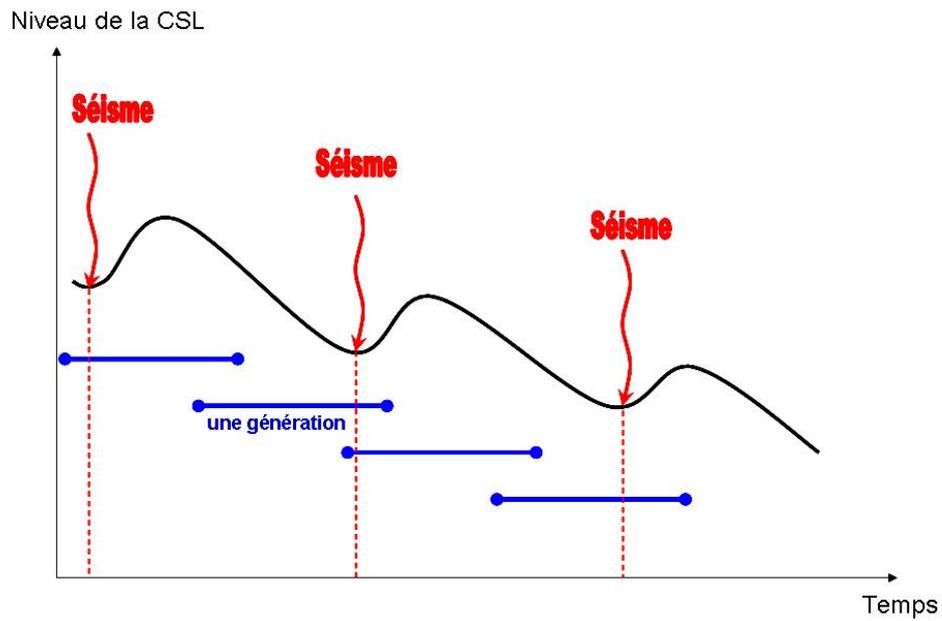


FIG. 2.4 – Niveau de la culture sismique locale en fonction du temps pour moins de deux séismes par génération, d'après [6]

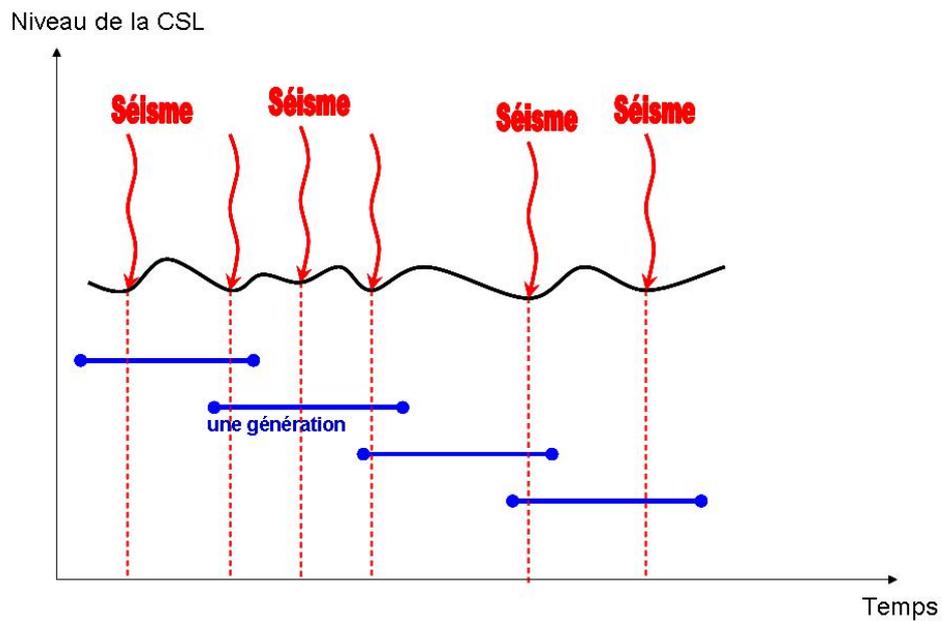


FIG. 2.5 – Niveau de la culture sismique locale en fonction du temps pour plus de deux séismes par génération, d'après [6]

sismique du bâti ancien.

2.3 Les connaissances empiriques tirées de l'observation

La problématique parasismique des constructions neuves est totalement différente de celle du bâti ancien. En effet, il est possible d'agir en amont, lors de la conception du projet, sur la géométrie et le site de construction. L'intervention sur les structures plus anciennes ne peut s'envisager sous le même angle puisqu'il est impossible de changer la nature du sol ou l'implantation de la construction et qu'il est difficile d'en modifier la géométrie sans risque. A partir de l'observation des conséquences de différents séismes et du mode de ruine des bâtiments, les populations ont su, au fil du temps, tirer des conclusions quant aux choses à faire ou à ne pas faire, [7] et [8].

2.3.1 En amont, si possible...

Le site de construction

En ce qui concerne la sélection du site, il y a bien sûr des considérations générales évidentes : ne pas construire dans une cuvette pour éviter les risques d'inondation, ni dans un site à proximité d'un grand nombre d'arbres afin d'éviter les endommagements par les racines,... Et les considérations sismiques : ni sur ni au pied d'une falaise avec fissures, loin des arbres ou des poteaux électriques inclinés, loin des murs de soutènements ayant souffert de séismes précédents... bref, éviter les effets de site (amplification par la topographie, sol médiocre comme des zones alluvionnaires, lacustres, etc... qui en plus peuvent liquéfier ou induire des tassements différentiels importants).

La géométrie

La configuration de la construction est très influente sur la stabilité d'un ouvrage sous séisme et particulièrement lors de la réponse en torsion du bâtiment. En effet, mieux vaut une forme en plan carrée pour éviter les effets de torsion. Si avoir une telle géométrie est impossible, opter pour une configuration symétrique dans les deux directions et un ratio entre longueur et largeur inférieur à 3 pour réduire ce phénomène de torsion. De plus, éviter les différences de hauteur dans une même construction permet de minimiser la concentration de compression dans les angles. Diviser la construction en petites parties symétriques, de hauteur et de longueur limitées est aussi un moyen de "stabiliser" le bâti.

2.3.2 Les techniques de renforcement relevées sur le bâti ancien

Les techniques listées ici ont surtout été observées dans le bassin méditerranéen où les recherches de cultures sismiques locales se sont concentrées jusqu'à maintenant, mais elles existent aussi ailleurs, [6].

Les contreforts et les escaliers extérieurs

Un contrefort est un élément rajouté sur un mur de maçonnerie existant pour conforter la structure (Fig. 2.6). La masse du bâti est certes plus importante mais le centre de gravité est abaissé ce qui donne une meilleure assise au bâti. Il s'agit d'une réponse courante des populations à un séisme et il est très couramment utilisé dans les constructions en pierre.

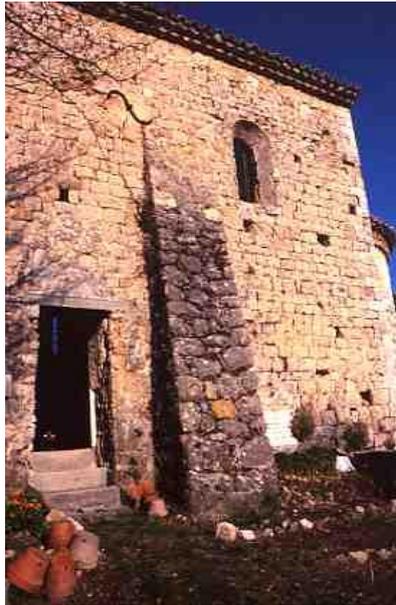


FIG. 2.6 – Eglise consolidée par un contrefort suite à un tremblement de terre (Photo A. Laurenti, Azurséisme)

Le rez-de-chaussée des maisons vernaculaires était souvent l'étable, et la pièce principale se trouvait au premier étage. Les escaliers qui permettent d'y accéder sont souvent conçus comme des contreforts extérieurs (Fig. 2.7) faisant d'une pierre deux coups.

Les voûtes et les arcs de décharges

Dans un tissu urbain, les habitations les plus vulnérables sont celles qui se trouvent en bout d'un alignement de façades. Ainsi, un passage étroit ou une petite rue est un point sensible. Des arcs de confortement rendent la continuité au tissu urbain et permettent la transmission des charges horizontales. Les immeubles se comportent comme un "tout".

Dans la même logique que les arcs de confortements, pour des rues plus larges, des portiques sont construits afin de conforter les immeubles affaiblis à la suite de gros tremblements de terre (Fig. 2.7, Fig. 2.8). Il s'agit d'un moyen efficace pour prévenir d'éventuelles basculements ou destructions de façades.



FIG. 2.7 – Illustration, une vieille rue de Peille, Alpes-Maritimes (Médiathèque de l'architecture et du patrimoine)



FIG. 2.8 – Portique dans une ruelle dans le sud de l'Italie (vacanceo.com)

En plus de leur côté sécuritaire, ces arcs ont un côté pratique car des pièces supplémentaires peuvent y être construites.

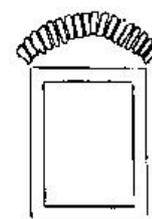
Les tirants

Les tirants sont utilisés pour retenir des murs en vis-à-vis. Cela évite par exemple le déplacement différentiel entre les appuis d'une toiture et l'empêche de tomber. Ils peuvent aussi solidariser des murs mitoyens.

Les ouvertures

Les ouvertures constituent un point faible dans un façade. En région sismique, les encadrements des portes sont très soignés et constitués de blocs taillés. Si cela était possible, les linteaux étaient réalisés dans un seul bloc de taille.

Ces précautions dans la réalisation et la finition des ouvertures peuvent ne pas suffire ou ne pas être suivies si les moyens matériels ou financiers ne sont pas suffisants. Plus modestes mais efficaces, les arcs de décharges permettent de répartir les charges dues au mur incriminé et de les transmettre de part et d'autre de l'ouverture (Figure ci-contre).



Les linteaux sont des pièces fragiles et souvent difficiles à réparer. Ainsi, il n'est pas rare de rencontrer des ouvertures qui ont été bouchées à la suite d'un tremblement de terre pour palier la rupture du linteau et rendre au mur toute sa résistance en prévision d'un nouveau séisme.

Les planches de bois

L'utilisation de planches de bois dans un mur maçonné (Fig. 2.9) permet de privilégier les zones de frottement stable entre le bois et les pierres. Ainsi, la résistance du mur vis-à-vis des efforts horizontaux augmente. Cet ajout de planche de bois dans un mur n'est pas spécifique à la maçonnerie de pierre.



FIG. 2.9 – Maison du Salvador (Photo R. Langenbach)

2.3.3 Les principales causes de vulnérabilité

L'observation des conséquences d'un séisme permet de lister un certain nombre de causes de vulnérabilité du bâti, et notamment du bâti ancien. En effet, un grand nombre de bâtiments est resté à l'abandon ou est mal entretenu, et ils sont souvent sujets à des transformations de nature à le fragiliser. Voici quelques exemples de faiblesses ou d'intervention à ne pas suivre, cette liste reste bien entendu non-exhaustive, mais d'une manière générale, ces faiblesses sont souvent dues à des réparations inappropriées.

Les ouvertures

Les ouvertures dans une façade constituent un point faible d'une structure. L'importance et la position des percées influencent la résistance de la maison. Si les ouvertures sont trop rapprochées, des fissures entre les coins des ouvertures peuvent apparaître sous séisme (Fig. 2.10). De plus, élargir les ouvertures bouleverse l'organisation des façades et ne fait qu'affaiblir les linteaux originaux dimensionnés pour des fenêtres ou des portes plus réduites.



FIG. 2.10 – Exemple de fissures entre ouvertures trop proches

Un mauvais choix de matériau

Introduire dans une maison en matériaux souples (argile, pisé, maçonnerie,...), des éléments beaucoup plus rigides, en béton armé par exemple, augmente la vulnérabilité. Les planchers en béton armé par exemple constituent un diaphragme rigide qui ne se déforme pas du tout de la même façon que les murs qui l'entourent, créant des tensions supplémentaires au niveau des angles.

De même, une toiture lourde et massive posée sur des appuis souples augmente la masse du bâti. Les charges sismiques imposées lors d'une secousse seront donc plus importantes et les murs porteurs, non dimensionnés à ces charges, ne manqueront pas de s'effondrer.

Dans le même ordre d'idée, une surélévation de la structure réalisée avec des matériaux plus rigides que les matériaux porteurs tend à fragiliser l'ensemble sauf si le

bâtiment est renforcé depuis sa base. En effet, la charge sismique est augmentée mais elle est essentiellement reprise par les étages inférieurs qui doivent donc être consolidés.

Le mauvais entretien

La résistance d'un bâtiment aux séismes dépend d'un certain nombre de facteurs mais elle est liée avant tout au matériau et à la résistance des éléments qui composent le bâti. Un mauvais entretien des murs porteurs et des éléments structuraux augmente, au fil du temps, la vulnérabilité de la structure.

Lors d'un séisme, un bâti peut être endommagé sans s'effondrer. Si aucune restauration ni aucun renforcement de l'édifice n'est envisagé, il sera clairement plus vulnérable lors du prochain séisme.

Le changement d'affectation et les transformations

Modifier trop profondément la structure d'un bâti l'affaiblit inévitablement. La suppression des murs porteurs est, bien sûr, une transformation qui entraîne une augmentation de la vulnérabilité du bâtiment voire des structures adjacentes. En effet, les immeubles d'habitations ont souvent été conçus en îlot avec des murs en commun et qui résiste comme un tout. Si une partie est affaiblie, toutes les constructions le sont aussi.

Le changement de destination d'un bâtiment est souvent accompagné de modifications du bâti. Ainsi, un bâtiment destiné à recevoir du public doit être modifier afin de respecter les règlements parasismiques et les règles d'accessibilité des personnes handicapées. Cependant, ces mesures rendent parfois assez difficile la réhabilitation et ne sont pas toujours adaptées au bâti vernaculaire.

La modification du tissu urbain

Il est assez courant de voir, dans un alignement de façades, une construction mal entretenue ou en ruine. Ces constructions sont souvent détruites au profit de petits espaces publics mais la vulnérabilité des bâtiments d'extrémité est accrue par ce vide et il est nécessaire de les renforcer pour ne pas voir les murs s'effondrer lors des prochains séismes.

La reconstruction d'immeubles neufs ou la surélévation de bâti plus ancien peut aussi être une cause de vulnérabilité en milieu urbain si les hauteurs de façades ne sont pas alignées. En effet, l'observation a montré que deux facades voisines de même hauteur résistent mieux que des façades de hauteurs différentes.

2.3.4 Conclusion

Une approche pluridisciplinaire telle que celle des cultures sismiques locales, permet de mettre en évidence un certain nombre de systèmes constructifs ayant prouvé au fil du temps leur efficacité sous séisme. Malheureusement, le manque de savoir scientifique sur les matériaux ou sur ces systèmes entraîne une perte des savoir-faire des populations locales.

Afin de faire avancer, très modestement, les connaissances dans ce domaine, nous avons fait le choix ici, d'un matériau local : le pisé, et nous avons cherché à caractériser ses paramètres élastiques de différentes façons.

Chapitre 3

Quelques expérimentations

Le pisé (Fig. 1.1) est un matériau difficile à caractériser car sa teneur en eau est variable, qu'il n'est pas tout à fait homogène et que sa cohésion est faible, inférieure à 2 MPa . De plus, prélever un échantillon de pisé pour l'étudier en laboratoire est quasi impossible. En effet, le carottage des murs en pisé est réalisable mais nécessite l'apport d'eau ce qui modifie alors les caractéristiques du matériau. A priori, caractériser la vulnérabilité sismique d'une maison en pisé ne peut donc se faire en laboratoire.

Nous avons choisi, lors de ce TFE, de nous restreindre, premièrement, à une partie de structure en pisé afin de valider ou non des protocoles expérimentaux qui pourront être utilisés à plus grande échelle et, deuxièmement, à l'étude du domaine élastique pour assoir nos connaissances. Afin de proposer une modélisation élastique du mur en L choisi, figure 3.1, déterminer les paramètres élastiques est indispensable et se fait par des essais en laboratoire qui seront croisés avec les mesures enregistrées des réponses du mur en L sous bruit mécanique ambiant ou sous faible sollicitation.

3.1 Protocole expérimental

Afin de réaliser une modélisation élastique du mur en L testé, le module de Young et le coefficient de Poisson¹ sont au minimum nécessaires. Prélever un échantillon de pisé sur le mur étant impossible sans modifier la résistance du mur ou les caractéristiques du matériau, des échantillons ont été réalisés avec la même terre et par le même artisan. Malheureusement, sur site, il n'est pas possible de mesurer la teneur en eau du mur même s'il n'était pas tout à fait "sec". On ne sait donc pas si les teneurs en eau de l'échantillon et du mur sont les mêmes. De plus, rien n'assure que la réalisation soit identique car la fabrication est manuelle et l'énergie de compactage n'est pas mesurée. A quel point cette différence non quantifiable entre-t-elle en jeu ? Dans le domaine élastique, les écarts sont-ils importants entre le mur et l'échantillon ?

¹Dans cette étude, il a été pris forfaitairement égal à 0.15 et la masse volumique prise égale à 1892 kg/m³ , d'après [10]



FIG. 3.1 – Photos du mur en L testé par le LGM

3.1.1 Réalisation des échantillons

Les échantillons de pisé² ont été réalisés par M. Nicolas Meunier, artisan de la région Rhône-Alpes. Le coffrage est fourni par l'artisan . Il est composé de quatre panneaux en acier, clavés entre eux (Fig. C.1). Ses dimensions sont 0.4 m × 0.4 m pour 1 m de haut. Chaque échantillon a été réalisé sur une plaque en acier en prévision d'éventuels tests de compression simple. La dame utilisée par Nicolas Meunier est une dame pneumatique (Fig. C.2).

Après avoir réglé la pression de celle-ci (Fig. C.3), clavé et placé le coffrage sur la plaque en acier servant de support à l'éprouvette, la réalisation peut commencer. Chaque couche de terre est réalisée à partir de 2 seaux de 11 litres afin d'obtenir des couches damées d'une dizaine de centimètres (Fig. C.4). Il est important, pour chaque couche, de répartir les agrégats et cailloux les plus gros (à l'aide d'une truelle éventuellement). Chaque échantillon est composé de 8 couches de terre compactée. Enfin, l'opération de décoffrage est un peu délicate. En effet, la poussée sur les parois est assez importante et déclaver de façon non symétrique risquerai d'endommager les arêtes des échantillons (Fig C.5).

Deux sortes de terres ont été utilisées : la même terre que les murs testés en dynamique et une terre recyclée du CSTB. Trois échantillons ont été réalisés avec la première terre (Fig. C.6) et un avec la seconde. De plus, Nicolas Meunier a aussi fabriqué un échantillon de pisé de seulement deux couches afin qu'on le teste en compression dans le sens des lits de terre.

Enfin, une portion de chaque terre a été placée dans l'étuve afin de mesurer sa teneur en eau au moment de la réalisation.

3.1.2 Essai de compression simple

Tester des échantillons de pisé si importants, n'est pas chose aisée. En effet, leurs dimensions sont assez imposantes et le poids de l'échantillon testé est de 210 kg environ. Afin de les transporter jusqu'à la presse et de les mettre en place, le chariot élévateur a été nécessaire. La face supérieure des échantillons a été rendue plane et régulière à l'aide d'un coulis de ciment pour que les efforts appliqués par la presse via une plaque métallique soient les plus répartis possibles. La plaque métallique supérieure est bien sûr retenue par des courroies pour éviter qu'elle ne tombe si l'échantillon de pisé se rompt brutalement.

Une fois l'échantillon et les capteurs en place (Fig. 3.2), les cycles de charge / décharge à réaliser sont programmés sur l'ordinateur relié à la presse. La contrainte du premier cycle correspond à la contrainte au pied du mur en L testé in situ, sous son poids propre. Mais ce mur peut aussi avoir subi d'autres charges, dues par exemple au vent ce qui explique pourquoi nous avons programmé deux autres cycles à un niveau de contrainte plus élevé.

L'essai peut commencer. Au fur et à mesure que la pression sur l'échantillon augmente, les lits se déforment formant des vagues sur chaque face. Chacun des lits n'est

²L'annexe C regroupe les photos citées dans cette description.



FIG. 3.2 – Echantillon de pisé sur la presse

pas compacté uniformément et la partie supérieure est plus tassée que la partie inférieure. Ainsi, pour une couche, la partie inférieure peut plus facilement se déformer sur le plan horizontal que la partie supérieure expliquant ainsi les "vagues" observées à la surface de l'échantillon, figure 3.2.

Bien sûr, le problème de l'homogénéité de l'essai se pose mais en considérant le volume élémentaire représentatif suffisamment grand, il est possible de considérer les contraintes dans l'échantillon comme homogènes en moyenne.

L'ordinateur enregistre la position du capteur et la charge correspondante ce qui nous permet de tracer une courbe contrainte / déformation, figure 3.3. Les courbes détaillées, pour chaque cycle, sont données aux figures 3.4, 3.5 et 3.6.

L'allure générale du diagramme contrainte / déformation permet déjà de montrer que le matériau pisé n'est pas purement élastique après des déformations de 10^{-3} . Sorti de cette zone de très petites déformations (ce qui est souvent le cas en pratique), le comportement général du pisé est un comportement plastique.

Cependant, lorsqu'on observe le premier cycle, les charges et décharges se font quasi linéairement. Il est possible de tracer la droite correspondante et d'en déduire un module d'élasticité qui est la pente de cette même droite. Pour ce premier cycle, on obtient un module de 180 MPa.

Il en est de même pour les cycles n°2 et n°3, pour lesquels on obtient respectivement

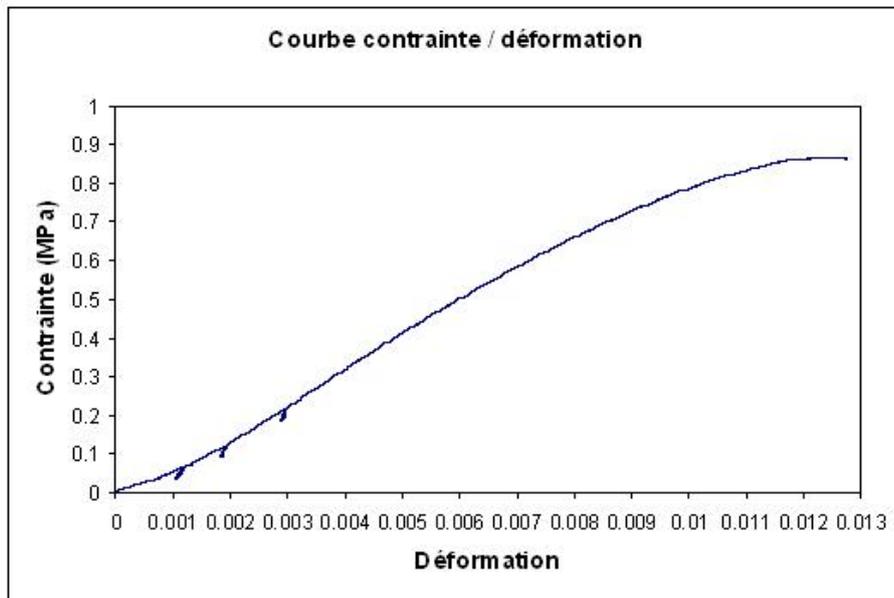


FIG. 3.3 – Diagramme contrainte / déformation issu de l'essai de compression simple avec trois cycles de charge / décharge

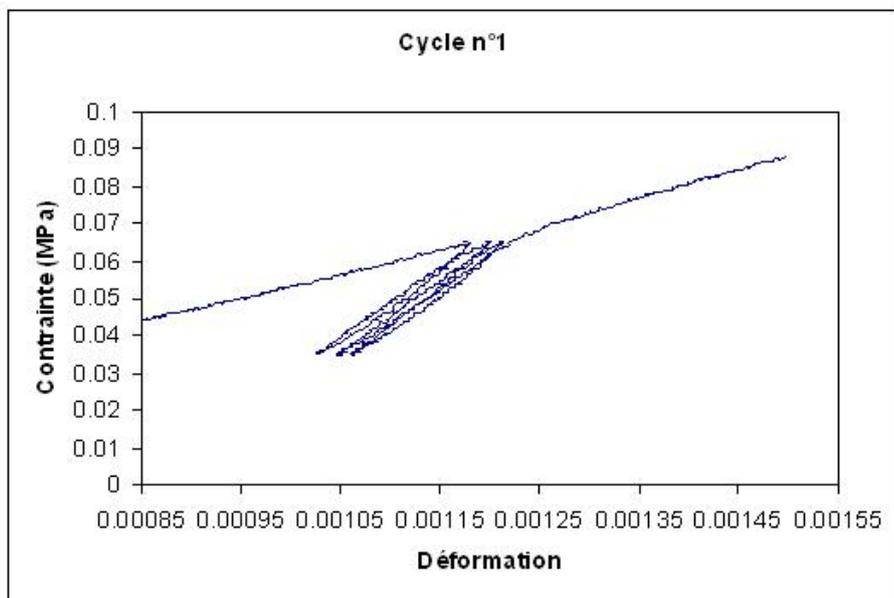


FIG. 3.4 – Diagramme contrainte / déformation, premier cycle de charge / décharge

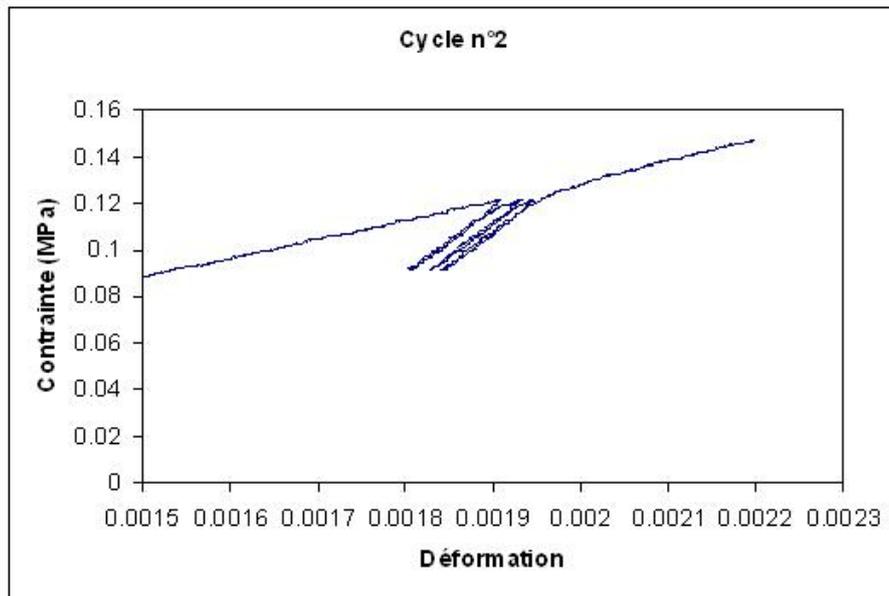


FIG. 3.5 – Diagramme contrainte / déformation, deuxième cycle de charge / décharge

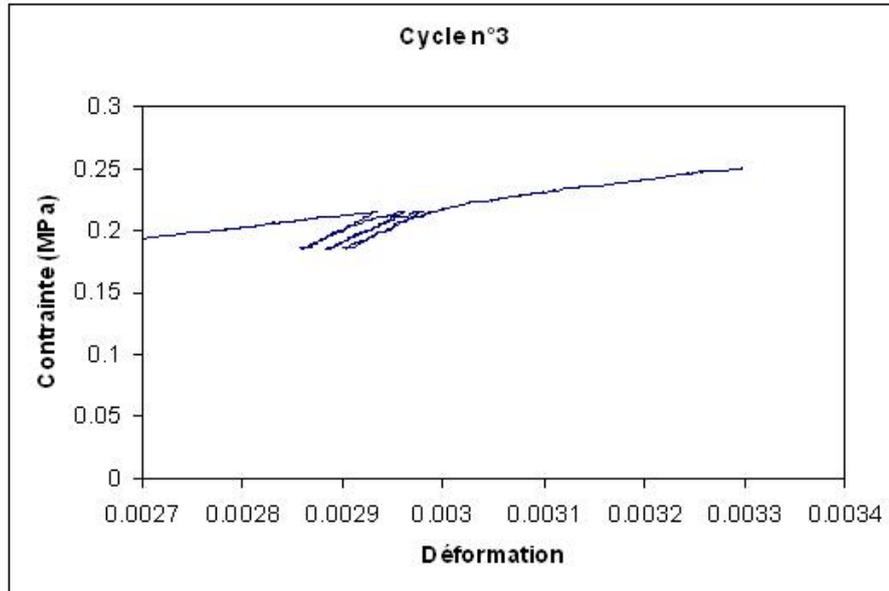


FIG. 3.6 – Diagramme contrainte / déformation, troisième cycle de charge / décharge

des modules élastiques de 255 MPa et 350 MPa.

Enfin, la teneur en eau de l'échantillon au moment de l'essai est mesurée à plusieurs endroits. En effet, le séchage de l'éprouvette ne peut pas être uniforme. De plus, le coulis de ciment qui a été appliqué pour surfacer la colonne, a pu modifier légèrement la teneur en eau de la couche supérieure. Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant et comme on pouvait s'y attendre la teneur en eau est plus petite sur les bords de l'échantillon.

Test	Teneur en eau (%)
1er lit	5.1
3ème lit (au coin)	3.8
4ème lit (au milieu)	6.2

Même si le pisé est plutôt un matériau plastique, on constate donc qu'on peut, à un niveau de contrainte donné, déterminer un module de Young pour ce matériau. Malheureusement, ce module élastique est très variable selon le niveau de contrainte appliqué.

Si on ignore le niveau de contrainte appliqué sur un élément que l'on veut calculer, il est alors assez difficile de caractériser le matériau en laboratoire et d'utiliser les codes de calculs usuels. Pouvoir déterminer les paramètres du matériau sur site est une bonne alternative pour pouvoir contourner cette difficulté.

3.1.3 Mesures dynamiques in-situ sur un mur en L

Il s'agit ici de caractériser le matériau en place. Les connaissances du matériau pisé sont limitées et connaître le comportement d'une maison sous séisme est complexe. Afin, d'avancer dans cette caractérisation, on peut tenter directement d'analyser la réponse du matériau in situ et de la comparer aux modélisations précédentes. Nous allons ici utiliser les essais faits par le LGM lors de la construction d'une maison en pisé et nous limiter à un seul mur. Les caractéristiques géométriques de celui-ci sont résumées, figure 3.7.

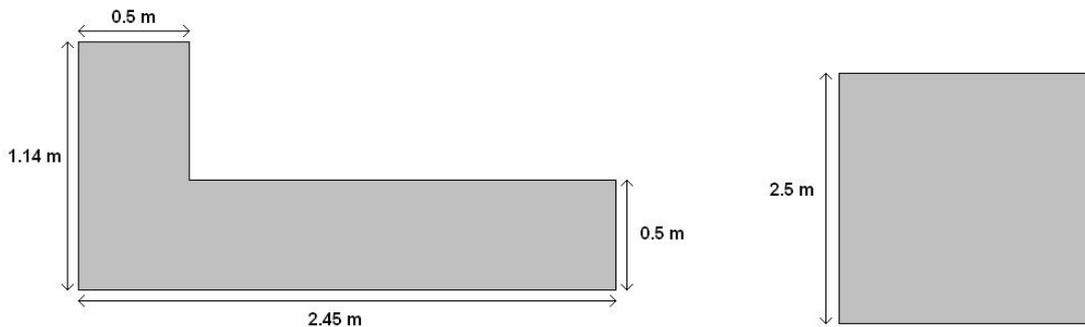


FIG. 3.7 – Dimensions du mur étudié ; vue en plan et vue en élévation

Afin de déterminer les fréquences propres du mur, plusieurs chocs ont été appliqués dans différentes directions sur le mur et la réponse a été enregistrée via des accéléromètres et une centrale d'acquisition. La position des capteurs sur le mur ainsi que la localisation des chocs sont schématisées à la figure 3.8.

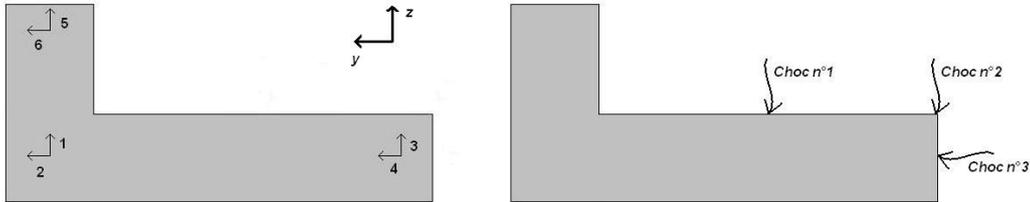


FIG. 3.8 – Localisation des capteurs et des chocs ; vue en plan

On travaille ici en petites déformations.

3.2 Traitement des mesures

Pour traiter les réponses obtenues, j'ai utilisé un programme Matlab disponible en annexe D. Il permet d'obtenir la transformée en ondelettes du signal enregistré par chacun des six capteurs. Il s'agit de représenter en fonction du temps, les fréquences propres et les amplitudes.

Les capteurs 1, 3 et 5 sont placés dans la direction z , et les capteurs 2, 4 et 6 dans la direction y . A partir des transformées en ondelettes, [11], on déduit les premières fréquences propres du mur ainsi que la direction des déformées propres correspondantes. Les transformées en ondelettes des six signaux enregistrés pour chaque choc sont représentées figures 3.9, 3.10, 3.11.

Si une fréquence propre n'est observée que sur une ligne de capteur donc sur une seule direction, il s'agit à cette fréquence, d'un mode "quasi-pur" de la direction incriminée. Sinon, il s'agit d'un mode de torsion.

Comme on peut le voir sur les figures 3.9 et 3.10, deux fréquences propres s'illustrent (environ 10.5Hz et 18 Hz) dans les deux directions puisqu'elles sont enregistrées par les six capteurs.

Les signaux enregistrés lors du choc 3 font apparaître les mêmes premières fréquences propres que précédemment (Fig. 3.11). Cependant, elles sont moins marquées dans la direction y du choc (capteurs 2, 4 et 6). Ainsi, on peut en déduire que le mode à 10.5 Hz est plutôt un mode dans la direction z .

Le mode à 18 Hz n'a pas de direction privilégiée puisqu'on l'enregistre pour les trois chocs et sur les deux directions.

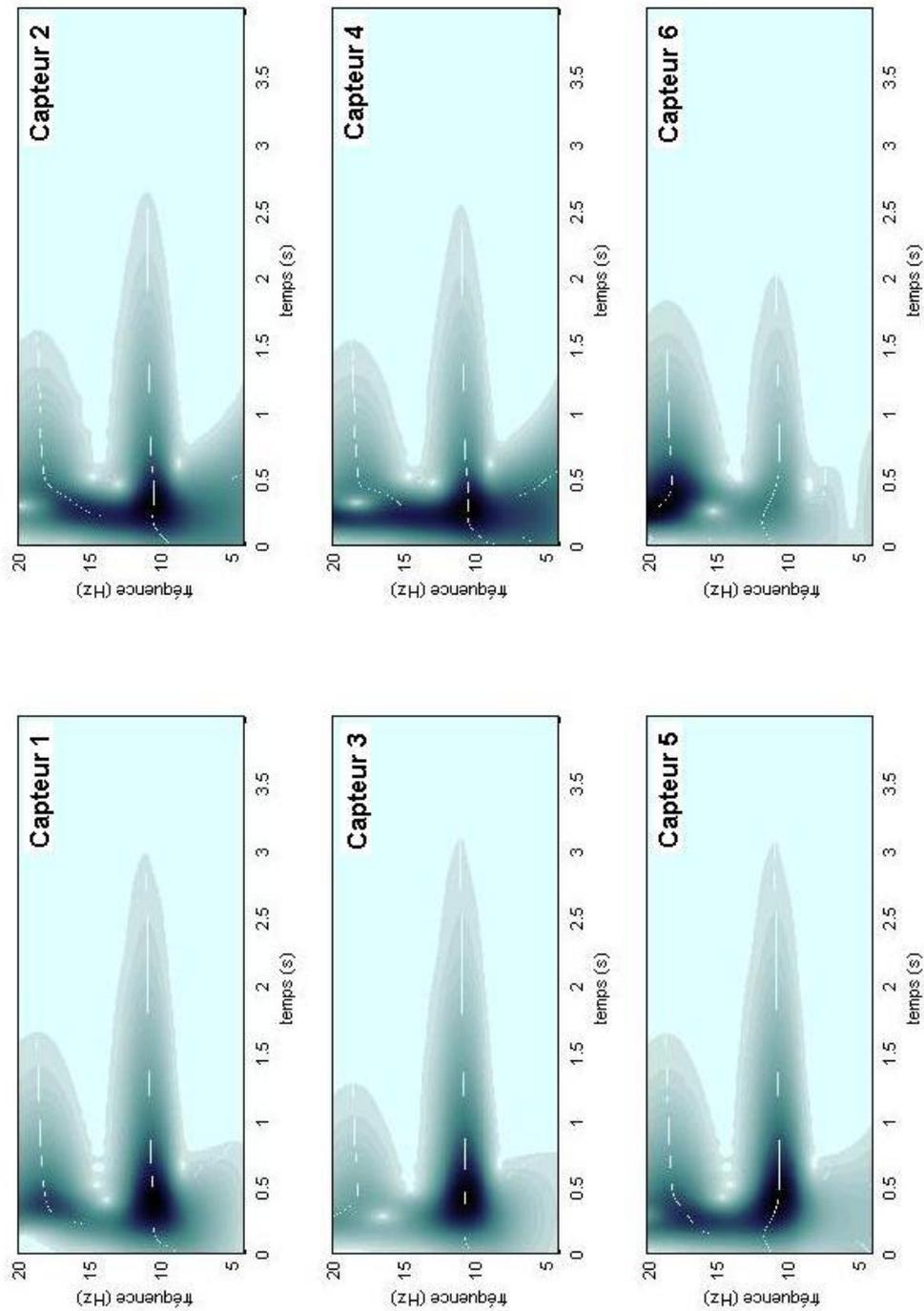


FIG. 3.9 – Choc 1 : Transformés en ondelettes de la réponse du mur enregistré par les différents capteurs

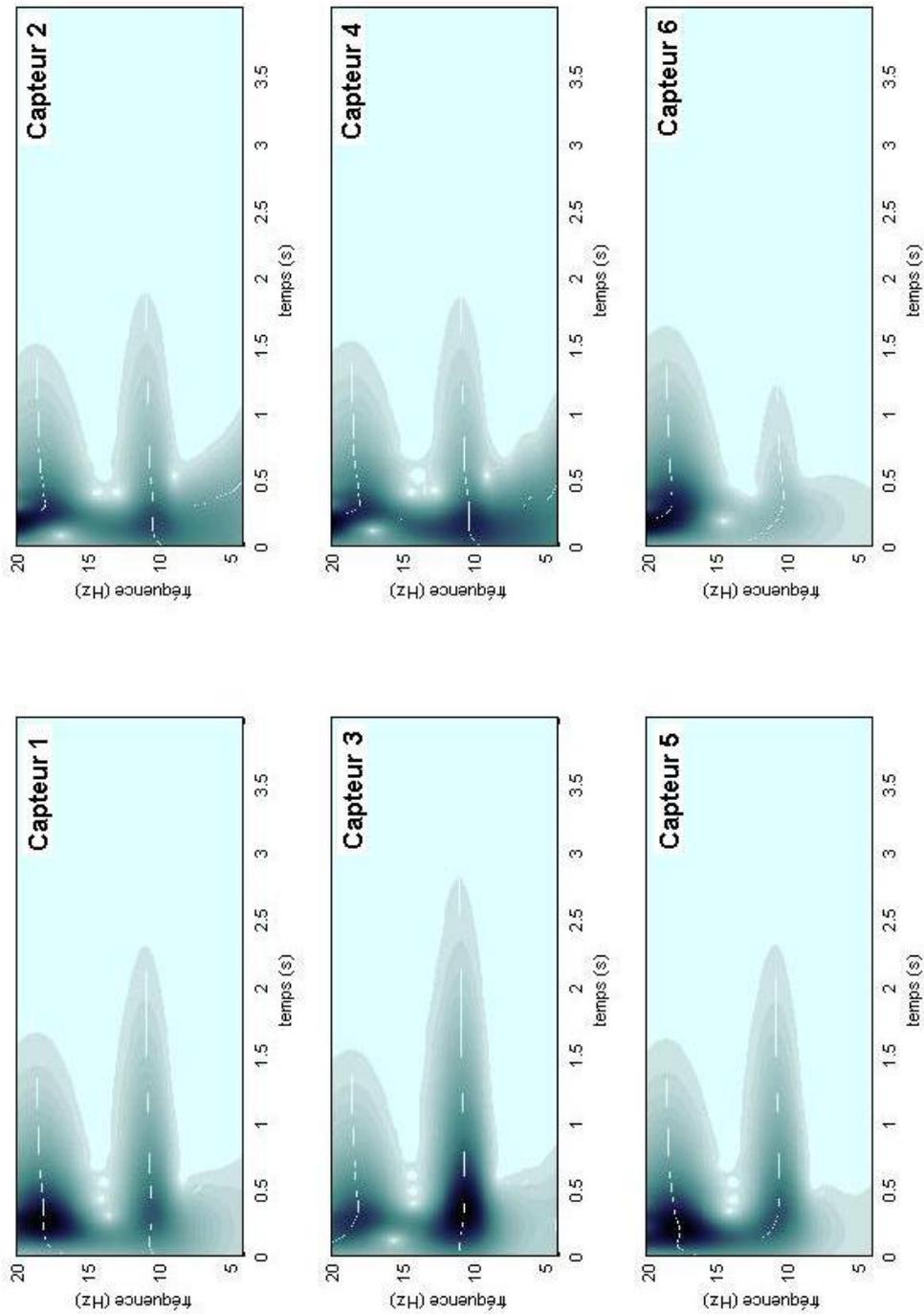


FIG. 3.10 – Choc 2 : Transformés en ondelettes de la réponse du mur enregistré par les différents capteurs

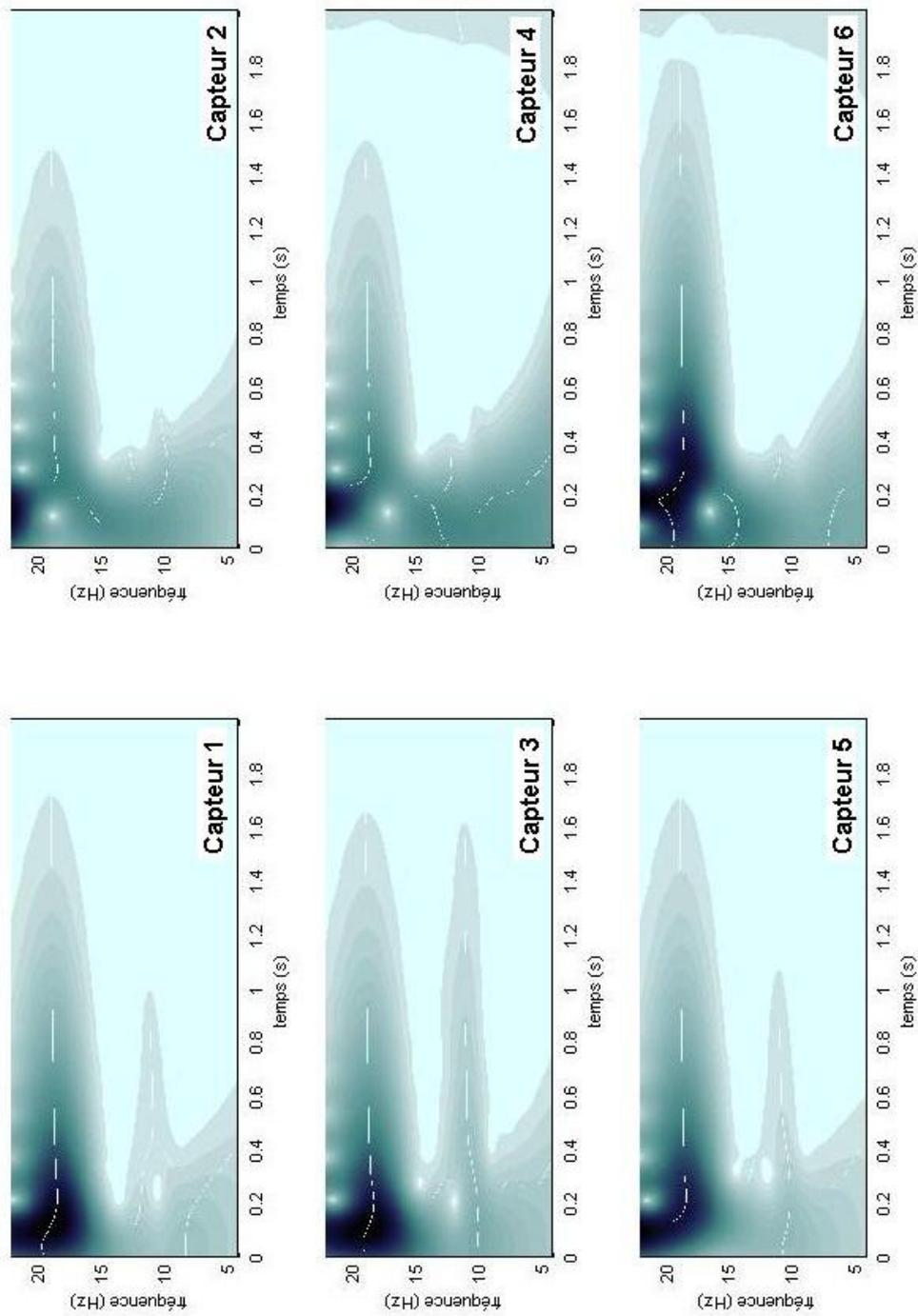


FIG. 3.11 – Choc 3 : Transformés en ondelettes de la réponse du mur enregistré par les différents capteurs

3.3 Modélisation

Les mesures réalisées ne permettent pas d'obtenir directement un module élastique. Une modélisation éléments finis du mur et des échantillons, et le calcul par cette méthode des fréquences propres du mur permet de déterminer le module de Young correspondant aux résultats obtenus précédemment.

3.3.1 Modélisation éléments finis sous CESAR

Le logiciel CESAR est un logiciel développé par le LCPC. Il s'agit d'un logiciel de calcul basé sur la méthode des éléments finis et adapté aux structures de Génie Civil.

Utiliser un tel logiciel permet d'avoir une première idée visuelle des différentes déformées et fréquences propres d'un élément. Le calcul éléments finis paraît plus proche de la réalité que le calcul par le modèle des poutres de Timoshenko, développé dans la suite. En effet, tous les effets sont ici pris en compte y compris la dissymétrie du mur et les efforts de torsion induits.

La définition du modèle sous CESAR se fait de façon assez linéaire. Après avoir défini le maillage représenté sur la figure 3.12, on définit les caractéristiques des matériaux et les conditions aux limites. Ici, le matériau est considéré comme isotrope.

On lance le calcul et on peut visualiser les résultats sous forme de déformées du mur par mode comme le montre la figure 3.14.

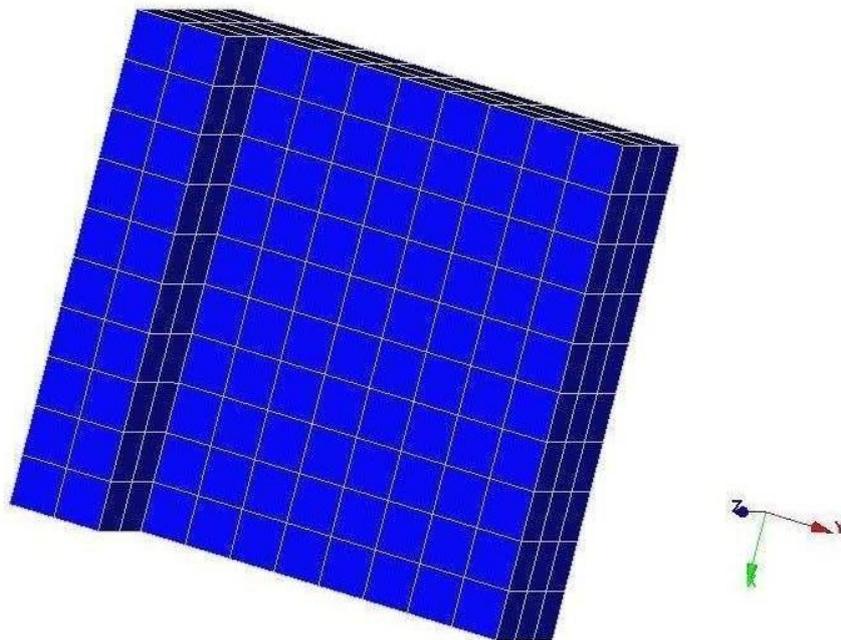


FIG. 3.12 – Maillage du mur étudié sous CESAR

En faisant varier le module de Young pour une même valeur du coefficient de Poisson ($\nu = 0.15$), on obtient la courbe de la figure 3.13 d'évolution des deux premières fréquences en fonction de E .

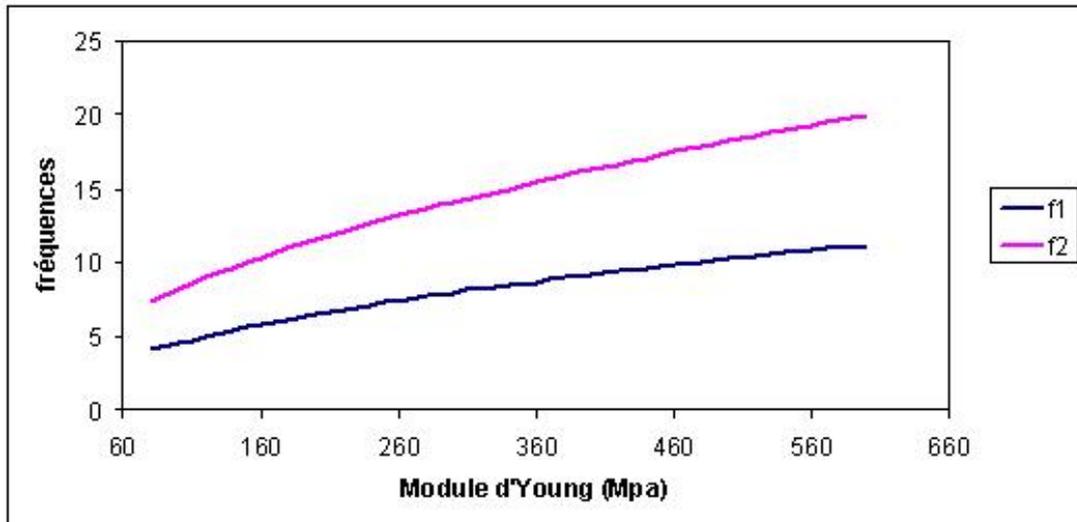


FIG. 3.13 – Evolution des fréquences propres du mur en L calculées sous CESAR en fonction de E

En croisant ces résultats de la modélisation et les résultats expérimentaux obtenus in situ, on en déduit que le module élastique du matériau constituant les murs est compris entre 475 MPa et 510 MPa. De plus, il est clair, sur la figure 3.14, que le premier mode est un mode de flexion selon z .

3.3.2 Théorie des poutres de Timoshenko

A la différence du modèle de poutre en flexion, le modèle de poutre de Timoshenko prend en compte les effets de cisaillement et de flexion. Cette théorie est donc plus complète qu'un simple modèle de poutre de flexion et permet, via les fréquences propres du mur, d'obtenir un module de Young théorique pour le mur en L.

Considérons une poutre de hauteur H encastree à sa base et libre en tête. Les caractéristiques de la section sont notées :

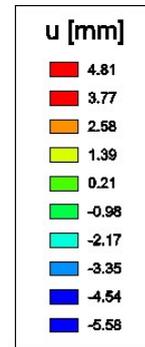
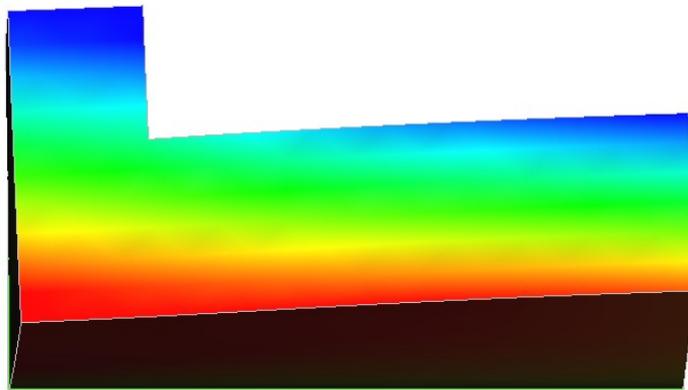
- S , la section de la poutre
- S_c , la section de cisaillement
- I , l'inertie de la section
- E , le module d'Young
- G , le module de cisaillement
- ρ , la masse volumique

De plus, notons :

- u , le déplacement de la fibre moyenne

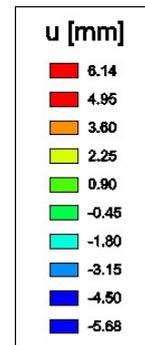
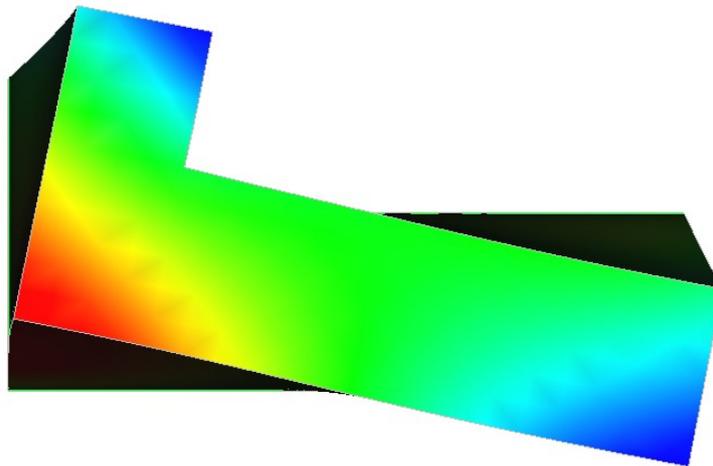
Quelques expérimentations

MODE : 1 = 10.03Hz



u -5.580e+000 mm (Node 11)
U3 2.492e+001 mm (Node 1408)

MODE : 2 = 17.86Hz



u 6.136e+000 mm (Node 170)
U3 3.311e+001 mm (Node 1)

FIG. 3.14 – Exemples de déformées propres du mur en L obtenues avec CESAR

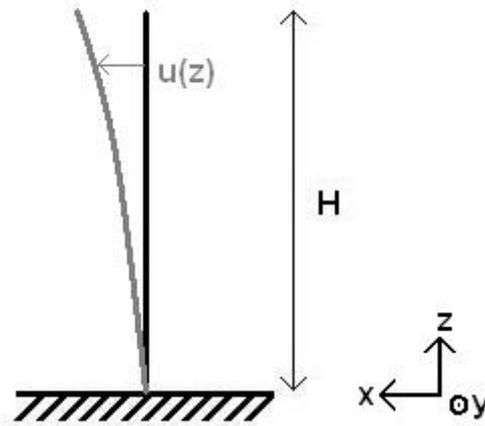


FIG. 3.15 – Poutre de Timoshenko

- β , la rotation de la section par rapport à la fibre moyenne (due à l'effet de cisaillement)
- $\alpha = u' + \beta$, la rotation totale de la section droite
- T , l'effort tranchant
- M , le moment fléchissant

Equations d'équilibre local de la section

$$-\rho S \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.1)$$

$$-T(z) = \frac{\partial M}{\partial z} \quad (3.2)$$

Loi de comportement

Elles sont données par la résistance des matériaux :

$$T(z) = GS_c \beta \quad (3.3)$$

$$M(z) = EI \frac{\partial \alpha}{\partial z} \quad (3.4)$$

Equation de la dynamique

En envisageant le cas harmonique $u(z, t) = f(z)e^{i\omega t}$, l'équation de la dynamique se déduit des équations précédentes et de l'expression de α :

$$\rho S \omega^2 f(z) = EI f^{(4)}(z) + \frac{EI \rho S \omega^2}{GS_c} f^{(2)}(z) \quad (3.5)$$

Résolution

Un logiciel de calcul différentiel, tel que Maple, nous permet d'obtenir la forme générale de la solution, avec $L = 2H/\pi$:

$$f(z) = a \cos(\delta_1 \frac{x}{L}) + b \sin(\delta_1 \frac{x}{L}) + c \operatorname{ch}(\delta_2 \frac{x}{L}) + d \operatorname{sh}(\delta_2 \frac{x}{L}) \quad (3.6)$$

où a, b, c, d sont des constantes dépendantes des conditions initiales et où les δ_1 et δ_2 vérifie :

$$\delta_1^2 \delta_2^2 = \frac{\rho S \omega^2 L^4}{EI} \quad (3.7)$$

$$\delta_1^2 - \delta_2^2 = \frac{\rho S \omega^2 L^2}{GS_c} \quad (3.8)$$

On introduit le paramètre adimensionnel C :

$$C = \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{\delta_1^2 \delta_2^2} = \frac{EI}{GS_c L^2} \quad (3.9)$$

qui permet de peser les effets de la flexion par rapport au cisaillement (ou inversement). Si C est grand, la flexion est prédominante, sinon, le cisaillement est prédominant.

Conditions aux limites

On considère la poutre encastree à sa base donc le déplacement et la rotation en $z = 0$ sont nulles. De plus, elle est libre en tête donc les efforts en $z = H$ sont nuls. Ainsi, on obtient un système de quatre équations à quatre inconnues qui n'a de solution que si son déterminant est nul. L'équation en fréquence du système traduit cette condition :

$$2(1 + \cos(\delta_1 \frac{\pi}{2}) \operatorname{ch}(\delta_2 \frac{\pi}{2})) \delta_1^2 \delta_2^2 - \sin(\delta_1 \frac{\pi}{2}) \operatorname{sh}(\delta_2 \frac{\pi}{2}) \delta_1 \delta_2 (\delta_1^2 - \delta_2^2) + \cos(\delta_1 \frac{\pi}{2}) \operatorname{ch}(\delta_2 \frac{\pi}{2}) (\delta_1^2 - \delta_2^2)^2 = 0 \quad (3.10)$$

Résolution numérique

Il est possible de tracer numériquement grâce au logiciel Maple, l'évolution de δ_1 et δ_2 en fonction de C pour différents modes (Fig. 3.16). On pourra ensuite en déduire l'évolution de la fréquence propre en fonction de ce même paramètre, d'après l'équation 3.7.

Application numérique

En utilisant l'évolution des paramètres ci-dessus, il est possible de calculer les premières fréquences propres via la théorie des poutres de Timoshenko. Cependant, comme le mur en L est non symétrique, il nous faut considérer deux inerties de flexion.

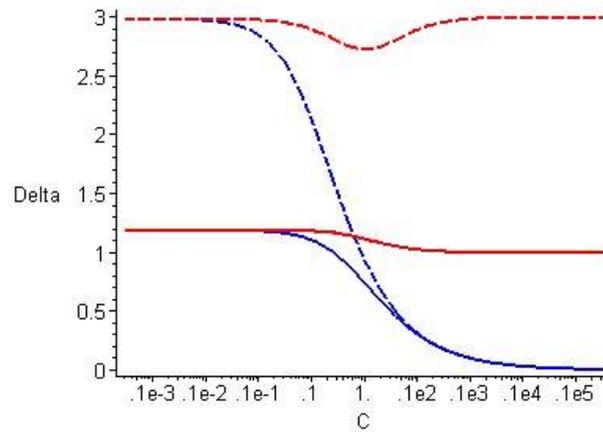


FIG. 3.16 – Evolution des paramètres delta en fonction de C pour les deux premiers modes

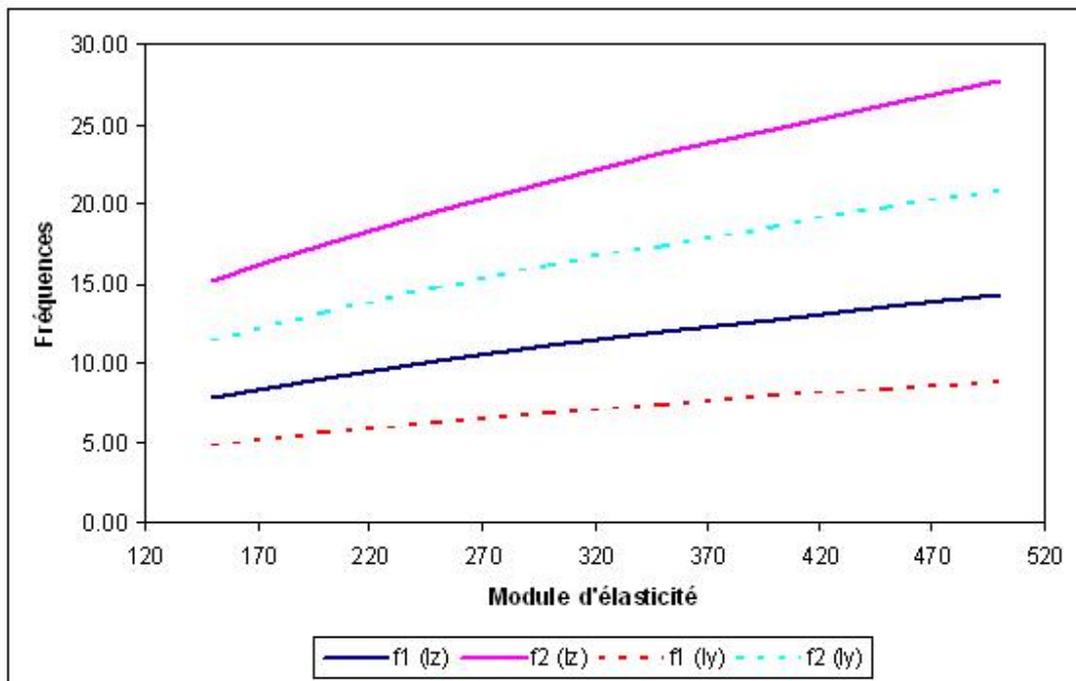


FIG. 3.17 – Evolution des fréquences issues de la théorie de Timoshenko pour les deux inertias I_y et I_z

Quelques expérimentations

Les résultats obtenus par Maple, pour différentes valeurs du module de Young sont représentées sur la figure 3.17. Les deux premières fréquences y sont représentées pour les deux inerties de flexion I_y (en pointillés) et I_z (en trait plein).

La première fréquence propre observée grâce aux essais in situ est d'environ 10.5 Hz dans la direction z . Considérons donc les valeurs obtenues avec cette théorie et l'inertie I_z . On retrouve la fréquence de 10.5 Hz pour un module élastique de 270 MPa. Retrouver la seconde fréquence propre à 18 Hz est plus complexe car elle est, selon les résultats précédents, présente dans les deux directions. Or sur la figure 3.17, on ne retrouve pas cette correspondance. Dans la direction z , le module est environ de 200 MPa et de 370 MPa dans la direction y .

Cette impossibilité de conclure à un module élastique est probablement due aux effets de torsion non pris en compte par la théorie des poutres de Timoshenko alors qu'ils existent puisque le mur n'est pas symétrique.

3.4 Conclusion

Pour réussir à obtenir le module élastique du pisé, un échantillon réalisé par Nicolas Meunier a été testé sous presse. Nous avons alors montré que plus la contrainte est importante plus le module est élevé. De plus, sous une contrainte correspondant au poids propre du mur, le module élastique attendu est de 180 MPa.

Plutôt que d'appliquer des théories physiques, la réponse d'un élément de structure (mur en L) à des chocs a été enregistrée in situ, afin de caractériser le matériau en place. La transformée en ondelettes de ces signaux fait apparaître deux fréquences propres.

Afin d'obtenir le module correspondant, ces résultats ont été croisés avec un modèle éléments finis du mur fait sous CESAR et une modélisation basée sur la théorie des poutres de Timoshenko pour obtenir une approximation du module d'élasticité.

Dans le tableau suivant, sont récapitulés les résultats des deux modélisations.

Fréquences propres obtenues in situ	E (MEF)	E (Timoshenko)
f1 = 10.5 Hz	475 MPa	270 MPa
f2 = 18 Hz	510 MPa	200 - 370 MPa

Les valeurs du module élastique obtenues via une modélisation éléments finis, sont relativement élevées par rapport aux valeurs obtenues lors de l'essai en laboratoire. Mais, dans cette modélisation, le matériau est considéré comme isotrope ce qui n'est à priori pas le cas étant donné la superposition de couches composant le matériau.

En ce qui concerne la modélisation de Timoshenko, l'impossibilité de conclure à un module pour la seconde fréquence est probablement due au fait que le mur n'est pas symétrique. En effet, des effets de torsion entrent en jeu du fait de cette asymétrie mais ils ne sont pas pris en compte dans la modélisation de Timoshenko. Par contre, les modules élastiques calculés sont plus proches et un peu supérieur à la valeur mesurée en

laboratoire. La contrainte réellement subie par le mur n'est pas due uniquement à son poids propre. Elle est donc plus importante que celle prise en laboratoire, expliquant l'écart entre les deux modules.

Il est donc assez difficile de conclure à un module d'élasticité pour le pisé composant le mur en L testé puisqu'on ignore le niveau de contrainte appliqué et la teneur en eau de ce dernier. Cependant, l'approche dynamique in situ permet tout de même d'obtenir les valeurs des fréquences propres de la partie de structure considérée indispensables à une analyse dynamique d'un bâti.

Chapitre 4

Théorie de l'homogénéisation et modèle en couche

4.1 Essais dynamiques en laboratoire

Des mesures dynamiques ont été réalisées sur les échantillons réalisés par Nicolas Meunier.

Les échantillons de terre ont été ancrés sur la dalle béton du laboratoire à l'aide de chevilles et de vis et des mesures réalisées par l'intermédiaire d'un vélocimètre à capteurs intégrés (Fig. 4.1). Ainsi, les mouvements dans les trois directions sont enregistrés.



FIG. 4.1 – Vélocimètre posé sur le haut de l'échantillon

Les enregistrements sont ensuite récupérés sur un ordinateur. Le traitement des résultats se fait de manière analogue à celui des enregistrements réalisés in-situ.

Plusieurs chocs ont été appliqués horizontalement au sommet de l'échantillon à l'aide

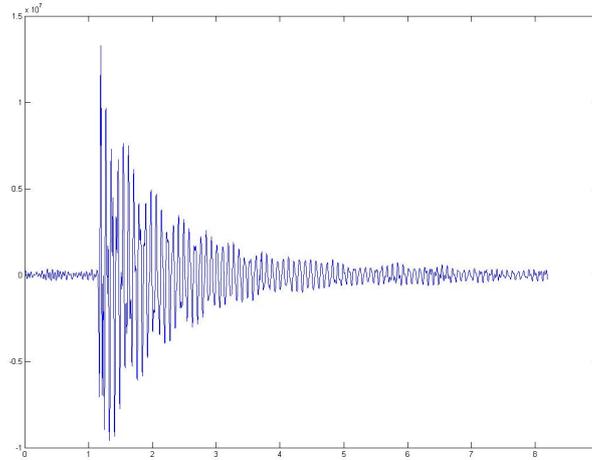


FIG. 4.2 – Signal correspondant à un choc horizontal au sommet de l'échantillon

d'un marteau. Les résultats fréquentiels obtenus par la transformation du signal en ondelettes sont sensiblement les mêmes pour tous les chocs : la première fréquence propre est environ de 11.8 Hz et la seconde de 25.5Hz.

4.2 Homogénéisation d'un milieu stratifié

Le but de la résolution de ce problème est de déterminer les paramètres élastiques macroscopiques d'un milieu composite formé de couches planes. Chaque couche est constituée d'un matériau dont les propriétés ne varient que dans l'épaisseur et périodiquement.

Nous noterons ici :

- \mathbf{a} , le tenseur d'élasticité,
- \vec{u} , le vecteur déplacement,
- $\mathbf{e}(\mathbf{u})$, le tenseur de déformation,
- σ , le tenseur des contraintes qui vérifie $\sigma = \mathbf{a} : \mathbf{e}(\mathbf{u})$.

4.2.1 Homogénéisation dans le cas général

On considère deux niveaux d'observation :

- le niveau macroscopique représenté par la variable X ,
- et le niveau microscopique représentés par les variables y_i .

Les inconnues du problème sont exprimées sous forme de développements asymptotiques des deux variables X et $y_1 = \epsilon^{-1}X$ puisqu'elles sont périodiques dans l'épaisseur. Ainsi, par exemple :

$$\vec{u}(X, y) = u^0(X, y) + \epsilon u^1(X, y) + \epsilon^2 u^2(X, y) + \dots \quad (4.1)$$

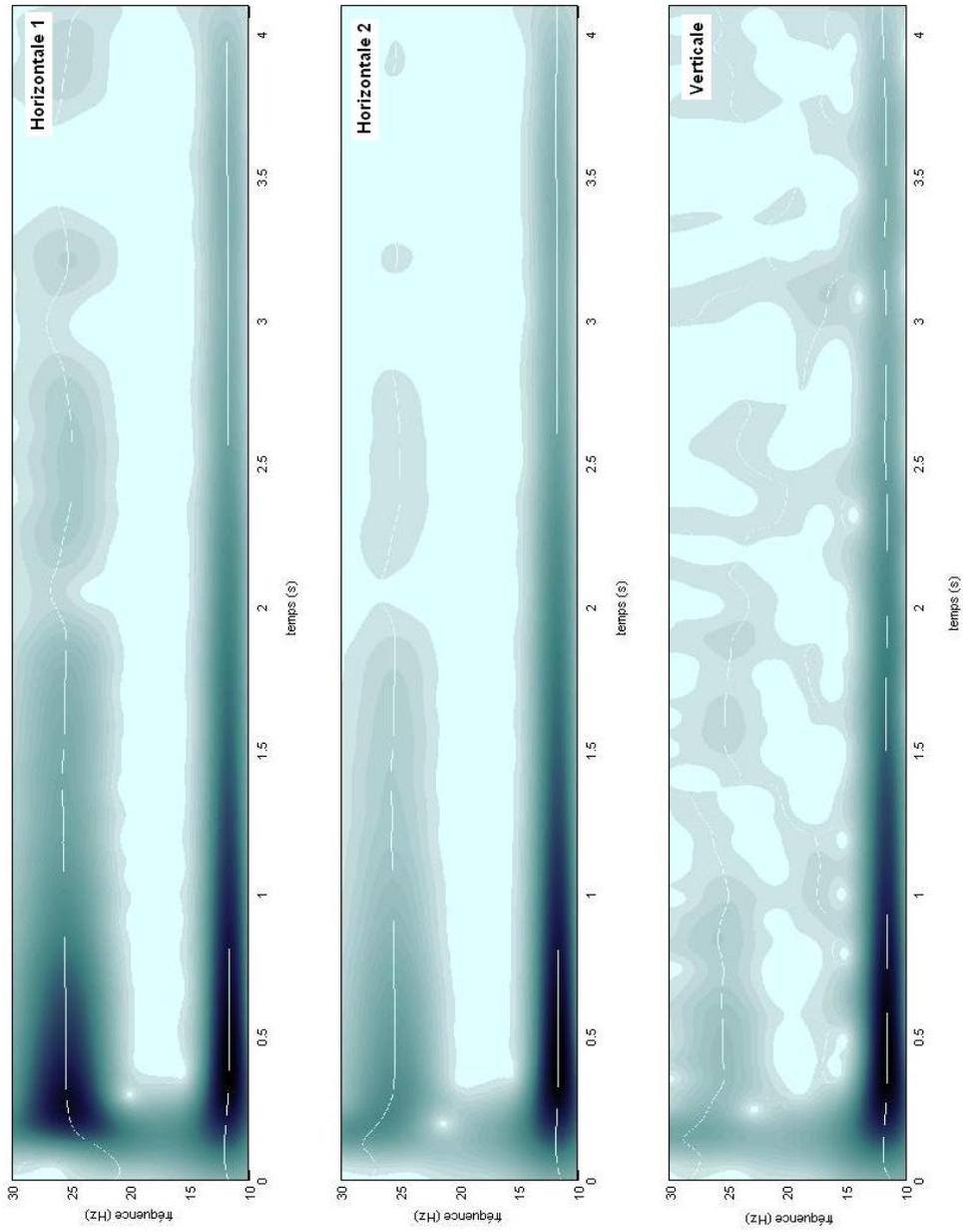


FIG. 4.3 – Transformés en ondelettes de la réponse de l'échantillon selon les trois directions

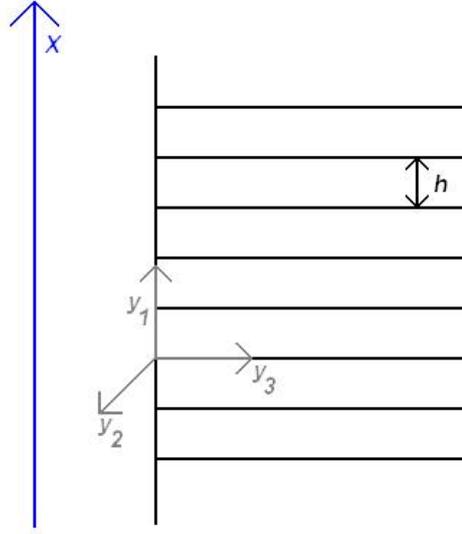


FIG. 4.4 – Schéma d'un milieu composé de couches planes

Il est à noter que $df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy = (\frac{\partial f}{\partial x} + \epsilon^{-1} \frac{\partial f}{\partial y}) dx$

Ainsi, les opérateurs tenseur de déformation, \mathbf{e} , et divergence, $d\vec{v}$, qui sont des opérateurs à base de dérivées s'expriment en fonction des deux variables X et y :

$$\mathbf{e} = \epsilon^{-1} \mathbf{e}_y + \mathbf{e}_X \quad (4.2)$$

$$d\vec{v} = \epsilon^{-1} d\vec{v}_y + d\vec{v}_X \quad (4.3)$$

On néglige ici le poids propre du matériau et l'équation indéfinie du mouvement se résume à :

$$d\vec{v}(\sigma) = \vec{0} \quad (4.4)$$

En incorporant le développement de σ^0 (cf. 4.1) et de $e(u)$ (cf. 4.1 et 4.3) dans 4.4 et en considérant que pour chaque ordre (ϵ^{-2} , ϵ^{-1} et ϵ^0) le problème correspondant doit converger, on obtient les trois problèmes suivants :

$$d\vec{v}_y(\mathbf{a} : \mathbf{e}_y(\vec{u}^0)) = \vec{0} \quad (\text{P0})$$

$$\begin{aligned} d\vec{v}_y(\sigma^0) &= \vec{0} \\ \sigma^0 &= \mathbf{a} : (\mathbf{e}_y(\vec{u}^1) + \mathbf{e}_X(\vec{u}^0)) \end{aligned} \quad (\text{P1})$$

$$\begin{aligned} d\vec{v}_y(\sigma^1) + d\vec{v}_X(\sigma^0) &= \vec{0} \\ d\vec{v}_X(\langle \sigma^0 \rangle) &= \vec{0} \\ \langle \sigma^0 \rangle &= \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \sigma^0 \partial \Omega = \mathbf{A} : \mathbf{e}_X(\vec{u}^0(X)) \end{aligned} \quad (\text{P2})$$

Conséquences de (P0)

...

4.2.2 Conséquences de la stratification plane

propriétés élastiques ($\mathbf{a}(y_1)$) et géométrie unidimensionnelle $\implies \vec{u}_1 = \vec{u}_1(y_1)$

\vec{u}^1 ne dépend que de y_1

Le tenseur de déformation vérifie, par définition :

$$\mathbf{e}_y(\vec{u}^1)_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_i u_j^1 + \partial_j u_i^1)$$

où ∂_i est l'opérateur $\frac{\partial}{\partial y_i}$.

De plus, $\partial_i u_j^1 = 0$ où $i \neq 1$ puisque \vec{u}^1 ne dépend que de y_1 .

Ainsi,

$$\mathbf{e}_y(\vec{u}^1) = \begin{pmatrix} \partial_1 u_1^1 & \frac{1}{2}(\partial_1 u_2^1) & \frac{1}{2}(\partial_1 u_3^1) \\ \frac{1}{2}(\partial_1 u_2^1) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(\partial_1 u_3^1) & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

σ^0 ne dépend que de y_1

Par définition, $\vec{div}_y(\sigma^0) = div_y(\sigma^0 \cdot \vec{y}_1) \vec{y}_1 + div_y(\sigma^0 \cdot \vec{y}_2) \vec{y}_2 + div_y(\sigma^0 \cdot \vec{y}_3) \vec{y}_3$ et σ^0 ne dépend que de y_1 , donc :

$$\vec{div}_y(\sigma^0) = \begin{pmatrix} \partial_1 \sigma_{11}^0 \\ \partial_1 \sigma_{12}^0 \\ \partial_1 \sigma_{13}^0 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

D'après P1, $\vec{div}_y(\sigma^0) = \vec{0}$. Donc, $\partial_1 \sigma_{1j}^0 = 0 \forall j \in 1, 2, 3$.

Les composantes σ_{1j}^0 pour $j = 1, 2, 3$ sont donc constantes sur la période.

4.2.3 Constituants isotropes

Considérons que chaque matériau composant les couches est isotrope. Le tenseur d'élasticité \mathbf{a} s'exprime en fonction des coefficients de Lamé. Ainsi, pour tout tenseur \mathbf{e} :

$$\mathbf{a}(y_1) : \mathbf{e} = \lambda(y_1) Tr(\mathbf{e}) \mathbf{I} + 2\mu(y_1) \mathbf{e} \quad (4.7)$$

Notons E_{ij} , les coefficients $\mathbf{e}_X(\vec{u}^0)_{ij}$. Ils sont indépendants de y_1 car d'après (P0), $u^0(X, y) = u^0(X)$.

D'après (P1), $\sigma^0 = \mathbf{a} : (\mathbf{e}_y(\vec{u}^1) + \mathbf{e}_x(\vec{u}^0))$. En utilisant (4.7) et la notations précédente, on obtient :

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}^0 &= a(y_1)_{ij} : (e_y(\vec{u}^1)_{ij} + E_{ij}) \\ \sigma_{ij}^0 &= \lambda(y_1)(Tr(e_y(\vec{u}^1) + e_x(\vec{u}^0)))\delta_{ij} + 2\mu(y_1)(e_y(\vec{u}^1)_{ij} + E_{ij}) \\ \sigma_{ij}^0 &= \lambda(y_1)(\partial_1 u_1^1 + E_{11} + E_{22} + E_{33})\delta_{ij} + 2\mu(y_1)(e_y(\vec{u}^1)_{ij} + E_{ij})\end{aligned}\quad (4.8)$$

Relation entre σ^0 et $\mathbf{e}_x(\mathbf{u}^0)$

A partir du résultat précédent, on peut calculer $\sigma_{23}^0 = 2\mu(y_1)E_{23}$.

Ainsi,

$$\langle \sigma_{23}^0 \rangle = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \mu(y_1)E_{23}\partial\Omega = 2 \langle \mu \rangle E_{23} \quad (4.9)$$

On a vu plus haut que les composantes σ_{ij}^0 pour $j = 1, 2, 3$ sont constantes sur la période.

Or, on connaît l'expression de σ_{13}^0 , d'après 4.8 :

$$\begin{aligned}\sigma_{13}^0 &= 2\mu(y_1)(e_y(\vec{u}^1)_{13} + E_{13}) \\ \sigma_{13}^0 &= 2\mu(y_1)\left(\frac{1}{2}(\partial_1 u_3^1) + E_{13}\right)\end{aligned}$$

$$\langle \frac{\sigma_{13}^0}{2\mu} \rangle - E_{13} = \left(\frac{1}{2} \langle \partial_1 u_3^1 \rangle\right)$$

Et, \vec{u}^1 est périodique sur Ω donc

$$\begin{aligned}\langle \partial_1 u_3^1 \rangle &= \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \partial_1 u_3^1(y_1)\partial\Omega \\ \langle \partial_1 u_3^1 \rangle &= \frac{1}{\Omega} (u_3^1(y_1 + h) - u_3^1(y_1)) \\ \langle \partial_1 u_3^1 \rangle &= 0\end{aligned}$$

On en déduit l'équation suivante :

$$\langle \frac{\sigma_{13}^0}{\mu} \rangle = \sigma_{13}^0 \langle \frac{1}{\mu} \rangle = 2E_{13} \quad (4.10)$$

De la même façon,

$$\sigma_{12}^0 \langle \frac{1}{\mu} \rangle = 2E_{12} \quad (4.11)$$

Exploitation de l'équation d'équilibre 4.6 selon y_1

D'après (P1) et (4.6) selon y_1 , $\partial_1 \sigma_{11}^0 = 0$, c'est-à-dire : $\sigma_{11}^0 = \text{constante}$.

Si on précède comme au paragraphe précédent en isolant $\partial_1 u_1^1$ dont la valeur moyenne est nulle, on obtient :

$$\langle \sigma_{11}^0 \rangle = \langle \frac{1}{\lambda + 2\mu} \rangle^{-1} [E_{11} + \langle \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \rangle E_{22} + \langle \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \rangle E_{33}] \quad (4.12)$$

Or selon (4.8), $\sigma_{11}^0 = \lambda(y_1)(\partial_1 u_1^1 + E_{11} + E_{22} + E_{33}) + 2\mu(y_1)(\partial_1 u_1^1 + E_{11})$.
 Pour simplifier les écritures, notons :

$$\alpha = \langle \frac{1}{\lambda + 2\mu} \rangle^{-1}$$

$$\alpha' = \langle \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \rangle$$

En utilisant les deux valeurs de σ_{11}^0 , on peut calculer $\partial_1 u_1^1$. Ainsi :

$$(\lambda + 2\mu)\partial_1 u_1^1 = (\alpha - \lambda - 2\mu)E_{11} + (\alpha\alpha' - \lambda)E_{22} + (\alpha\alpha' - \lambda)E_{33} \quad (4.13)$$

Calculons σ_{22}^0 et σ_{33}^0 sachant, d'après (4.5), que $e_y(\vec{u}^1)_{22} = 0$ et $e_y(\vec{u}^1)_{33} = 0$.
 D'après ce qui précède (4.13), et (4.8),

$$\sigma_{22}^0 = \frac{\lambda\alpha}{\lambda + 2\mu}E_{11} + \left[\frac{\lambda\alpha\alpha'}{\lambda + 2\mu} - \frac{\lambda^2}{\lambda + 2\mu} + \lambda + 2\mu \right] E_{22} + \left[\frac{\lambda\alpha\alpha'}{\lambda + 2\mu} - \frac{\lambda^2}{\lambda + 2\mu} + \lambda \right] E_{33}$$

$$\sigma_{33}^0 = \frac{\lambda\alpha}{\lambda + 2\mu}E_{11} + \left[\frac{\lambda\alpha\alpha'}{\lambda + 2\mu} - \frac{\lambda^2}{\lambda + 2\mu} + \lambda \right] E_{22} + \left[\frac{\lambda\alpha\alpha'}{\lambda + 2\mu} - \frac{\lambda^2}{\lambda + 2\mu} + \lambda + 2\mu \right] E_{33}$$

Notons aussi :

$$\beta = \langle \frac{\lambda^2}{\lambda + 2\mu} \rangle$$

$$\gamma = \langle \lambda + 2\mu \rangle$$

On obtient donc,

$$\langle \sigma_{22}^0 \rangle = \alpha\alpha'E_{11} + [\alpha\alpha'^2 - \beta + \gamma]E_{22} + [\alpha\alpha'^2 - \beta + \langle \lambda \rangle]E_{33} \quad (4.14)$$

$$\langle \sigma_{33}^0 \rangle = \alpha\alpha'E_{11} + [\alpha\alpha'^2 - \beta + \langle \lambda \rangle]E_{22} + [\alpha\alpha'^2 - \beta + \gamma]E_{33} \quad (E6)$$

Relation entre les valeur moyenne du tenseur des contraintes et le tenseur de déformation macroscopique

$\langle \sigma^0 \rangle$ est symétrique ainsi que $\mathbf{e}_\mathbf{x}(\mathbf{u}^0)$ donc, d'après toutes les équations sur $\langle \sigma_{ij}^0 \rangle$ déterminées précédemment, la relation entre le tenseur des contraintes et le tenseur de déformation macroscopique s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \langle \sigma_{11}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{22}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{33}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{23}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{13}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{12}^0 \rangle \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ E_{23} \\ E_{13} \\ E_{12} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$M = \begin{pmatrix} \alpha & \alpha\alpha' & \alpha\alpha' & 0 & 0 & 0 \\ \alpha\alpha' & \alpha\alpha'^2 - \beta + \gamma & \alpha\alpha'^2 - \beta + \langle \lambda \rangle & 0 & 0 & 0 \\ \alpha\alpha' & \alpha\alpha'^2 - \beta + \langle \lambda \rangle & \alpha\alpha'^2 - \beta + \gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \langle 2\mu \rangle & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \langle \frac{1}{2\mu} \rangle^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle \frac{1}{2\mu} \rangle^{-1} \end{pmatrix}$$

où

$$\alpha = \langle \frac{1}{\lambda + 2\mu} \rangle^{-1} \quad \alpha' = \langle \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \rangle$$

$$\beta = \langle \frac{\lambda^2}{\lambda + 2\mu} \rangle \quad \gamma = \langle \lambda + 2\mu \rangle$$

On remarque en observant M que le matériau est ainsi défini, est un matériau orthotrope.

4.3 Confrontation des résultats

4.3.1 Application du développement précédent à un échantillon de pisé

Dans l'ensemble de l'étude les paramètres élastiques utilisés sont E , le module d'élasticité et ν , le coefficient de poisson.

Chaque couche du matériau étant isotrope, on peut remplacer λ et μ par :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Considérons que la variation du paramètre E est linéaire (Fig. 4.5) sur la hauteur h et que ν reste constant.

Déterminons la matrice M, sachant que $\langle \nu \rangle = \nu$, $\langle E \rangle = \frac{E_1 + E_2}{2}$ et $\langle \frac{1}{E} \rangle = \frac{1}{E_2 - E_1} \ln\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$.

On a :

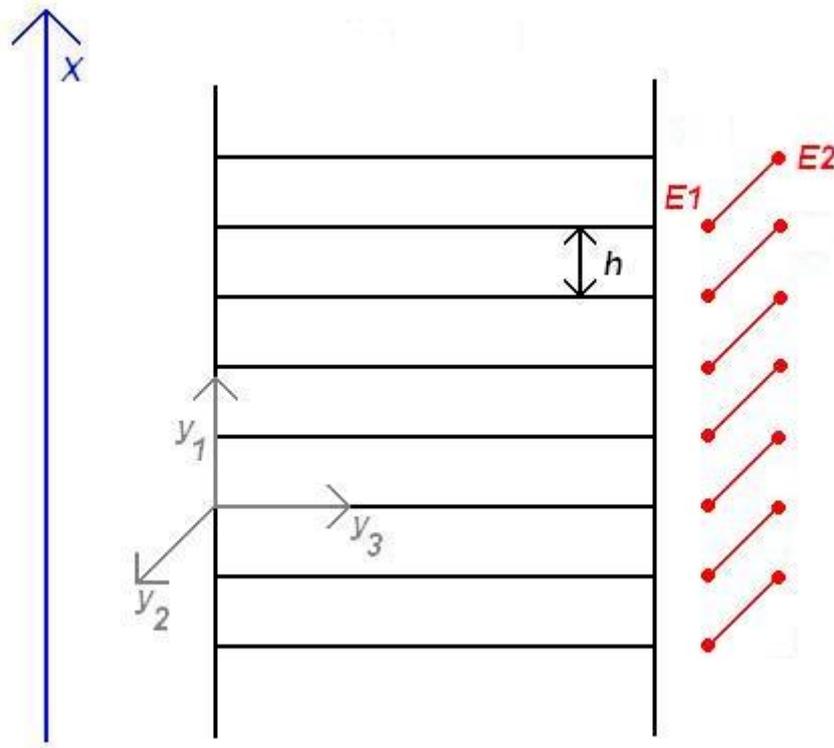


FIG. 4.5 – Première approche : variation linéaire de E sur la hauteur d'une couche

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{(1-\nu)(E_2-E_1)}{(1+\nu)(1-2\nu)\ln(\frac{E_2}{E_1})} \\ \alpha\alpha' &= \frac{(E_2-E_1)\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)\ln(\frac{E_2}{E_1})} \\ \alpha\alpha'^2 &= \frac{(E_2-E_1)\nu^2}{(1+\nu)(1-\nu)(1-2\nu)\ln(\frac{E_2}{E_1})} \\ \beta &= \frac{(E_2+E_1)\nu^2}{2(1+\nu)(1-\nu)(1-2\nu)} \\ \langle 2\mu \rangle &= \frac{(E_1+E_2)}{2(1+\nu)} \\ \langle \lambda \rangle &= \frac{(E_1+E_2)\nu}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \gamma &= \frac{(E_1+E_2)(1-\nu)}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \langle \frac{1}{2\mu} \rangle^{-1} &= \frac{(E_2-E_1)}{(1+\nu)\ln(\frac{E_2}{E_1})}\end{aligned}$$

Vérification pour le cas où E est constant

Pour repérer les erreurs de calcul éventuelles, calculons les paramètres précédents pour $E_1 = E_2 = E$ et comparons la valeur de M à la matrice de comportement d'un matériau linéaire isotrope.

En utilisant le développement limité de $\ln(1+\epsilon)$ quand $\epsilon = \frac{E_2}{E_1} - 1 \rightarrow 0$, on obtient :

$$\lim_{E_1 \rightarrow E} \frac{E_2 - E_1}{\ln(\frac{E_2}{E_1})} = E$$

Ainsi, on a bien :

$$\lim_{E_1 \rightarrow E} \alpha = \lambda + 2\mu$$

$$\lim_{E_1 \rightarrow E} \alpha\alpha' = \lambda$$

$$\lim_{E_1 \rightarrow E} \alpha\alpha'^2 - \beta + \langle \lambda \rangle = \lambda$$

$$\lim_{E_1 \rightarrow E} \alpha\alpha'^2 - \beta + \gamma = \lambda + 2\mu$$

$$\lim_{E_1 \rightarrow E} \langle 2\mu \rangle = 2\mu$$

$$\lim_{E_1 \rightarrow E} \langle \frac{1}{2\mu} \rangle^{-1} = 2\mu$$

et

$$M = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{pmatrix}$$

On retrouve l'équation de comportement d'un matériau linéaire isotrope :

$$\sigma = \lambda Tr(\epsilon)\delta + 2\mu\epsilon$$

Calcul des caractéristiques du matériau orthotrope

D'après les premiers essais que nous avons menés et qui sont décrits dans le chapitre précédent, le module de Young du matériau pisé est variable et les valeurs obtenues se trouvent dans une fourchette de valeurs de 100 à 500 MPa.

Calculons donc la matrice M pour $\nu = 0.15$, $E_1 = 100MPa$ et $E_2 = 500MPa$. La valeur du coefficient de Poisson utilisée est celle prise dans les modélisations d'éléments en pisé présentées précédemment.

Ainsi,

$$M = \begin{pmatrix} 262.34 & 46.29 & 46.29 & 0 & 0 & 0 \\ 46.29 & 315.08 & 54.21 & 0 & 0 & 0 \\ 46.29 & 54.21 & 315.08 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 260.87 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 216.04 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 216.04 \end{pmatrix}$$

Or, le comportement d'un matériau isotrope de révolution autour de l'axe y_1 est décrit par : E_l , E_t , ν_{tt} , ν_{lt} , G_{lt} où l'indice l signifie "longitudinal à l'axe de révolution" et t "transverse à l'axe de révolution".

L'équation de comportement s'écrit :

$$\begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ E_{23} \\ E_{13} \\ E_{12} \end{pmatrix} = S. \begin{pmatrix} \langle \sigma_{11}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{22}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{33}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{23}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{13}^0 \rangle \\ \langle \sigma_{12}^0 \rangle \end{pmatrix}$$

Avec :

$$S = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_l} & -\frac{\nu_{lt}}{E_t} & -\frac{\nu_{lt}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{tl}}{E_l} & \frac{1}{E_t} & -\frac{\nu_{tt}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{tl}}{E_l} & -\frac{\nu_{tt}}{E_t} & \frac{1}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{tt}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{lt}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{lt}} \end{pmatrix}$$

où

$$\frac{1}{2G_{tt}} = \frac{1 + \nu_{tt}}{E_t}$$

$$\frac{\nu_{tl}}{E_l} = \frac{\nu_{tt}}{E_t}$$

D'où, par identification des coefficients de M^{-1} et de S ,

$$E_l \approx 250.75 \text{ MPa}$$

$$E_t \approx 300.03 \text{ MPa}$$

$$\nu_{tt} \approx 0.15$$

$$\nu_{tl} \approx 0.15$$

$$\nu_{lt} \approx 0.12$$

$$G_{tt} \approx 130.45 \text{ MPa}$$

$$G_{lt} \approx 108.04 \text{ MPa}$$

4.3.2 Modélisation sous Cesar de l'échantillon

Il est possible de modéliser l'échantillon de pisé sur le logiciel Cesar comme on l'a fait pour le mur.

Dans un premier temps, modélisons le matériau comme un matériau isotrope. On obtient les 3 premières fréquences propres (horizontale, verticale et de torsion). Les variations de ces fréquences en fonction de E sont représentées sur la figure 4.7.

Prenons les fréquences propres obtenues en laboratoire (Fig. 4.3) : 11.8 Hz et 25.5 Hz ; et reportons les sur le graphe 4.7, on déduit un module d'Young de l'ordre de 20 à 30 MPa. Ce résultat n'est pas vraiment cohérent avec les modules obtenus in-situ.

En utilisant la théorie de l'homogénéisation et les paramètres élastiques d'orthotropie du matériau ainsi définis, il est possible d'effectuer une modélisation orthotrope du matériau sous Cesar.

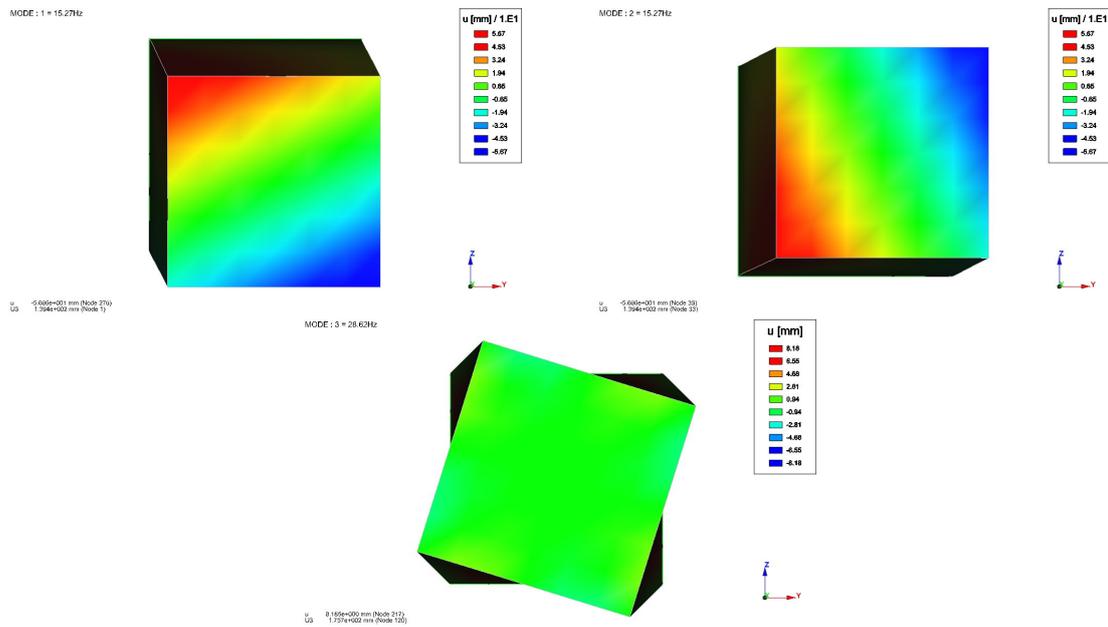


FIG. 4.6 – Exemples de déformées propres des échantillons obtenues avec CESAR pour une modélisation isotrope

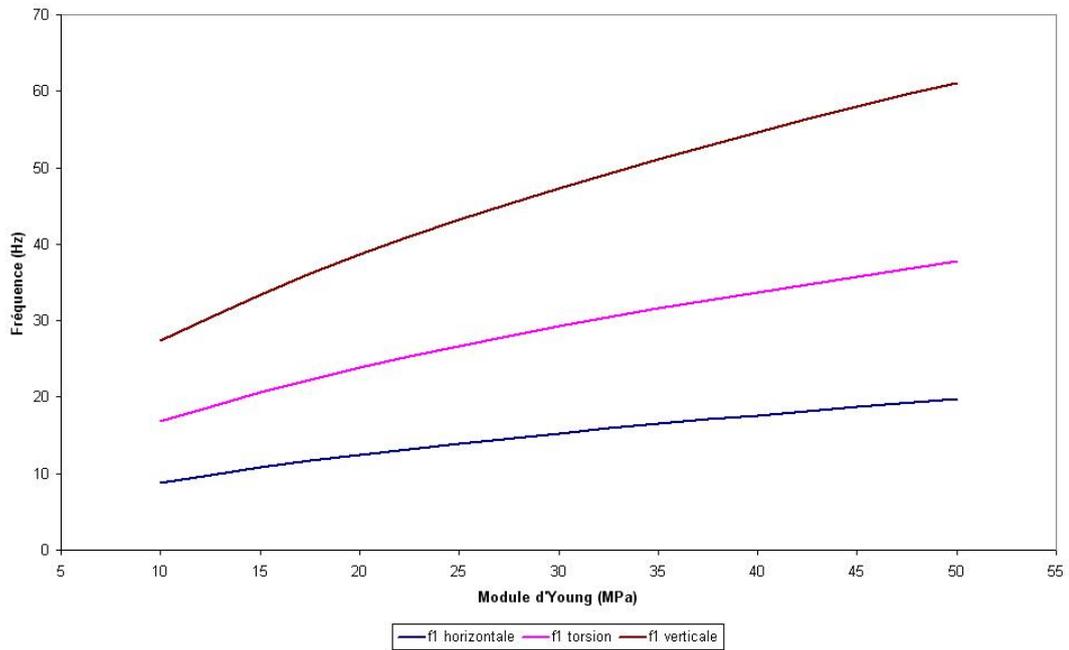


FIG. 4.7 – Evolution des fréquences propres des échantillons calculées sous CESAR en fonction de E pour un matériau isotrope

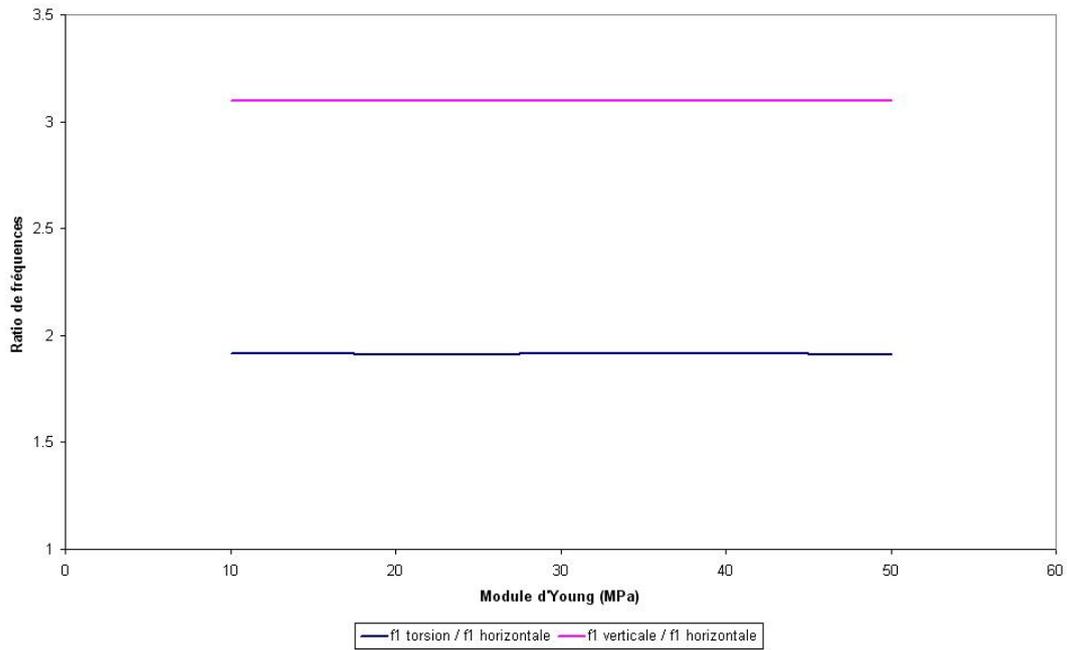


FIG. 4.8 – Evolution des ratios de fréquences pour un matériau isotrope

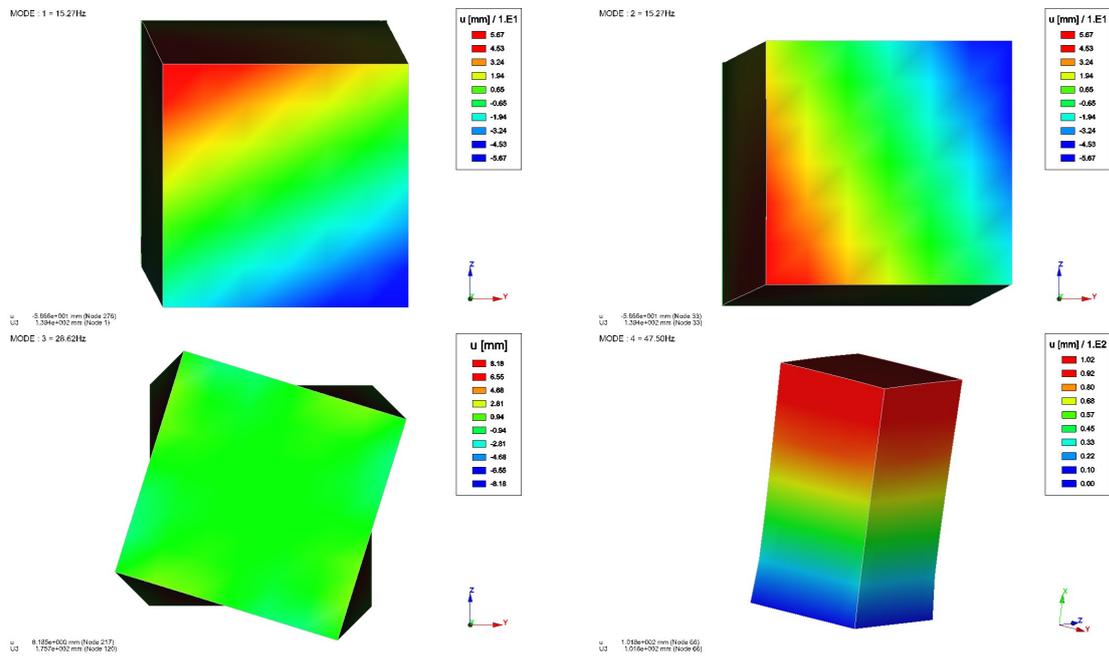


FIG. 4.9 – Exemples de déformées propres des échantillons obtenues avec CESAR pour une modélisation orthotrope

Avec les valeurs $E_1 = 100 \text{ MPa}$ et $E_2 = 500 \text{ MPa}$, on obtient les premières fréquences propres suivantes :

- f_1 *horizontale* = 15.27 Hz
- f_1 *torsion* = 28.62 Hz
- f_1 *verticale* = 47.50 Hz

Ces valeurs de fréquences sont assez proches des valeurs obtenues expérimentalement en laboratoire et pour des valeurs de module de Young plus cohérentes avec les études menées in-situ.

Par manque de temps, d'autres calculs de fréquences propres avec des modules différents n'ont pas pu être menés et cette approche n'a pas été optimisée même si les premiers résultats sont encourageants.

4.3.3 Conclusion

L'approche théorique du matériau pisé par l'homogénéisation est concluante dans le cas des essais dynamiques que nous avons menés sur les échantillons mais elle nécessiterait de connaître de façon précise les valeurs de E_1 et E_2 via des essais complémentaires pour pouvoir être validée correctement.

Chapitre 5

Essais exploratoires sur une maison en pisé

Après avoir été confrontés à la difficulté de caractériser le matériau pisé, nous nous sommes intéressés à une maison en pisé de forme simple pour tenter d'obtenir des caractéristiques globales de vulnérabilité sismique de cette structure.

5.1 Description de la maison

La maison en question est située sur la commune de Saint-Jean de Bournay dans l'Isère. Elle est de forme rectangulaire simple (Fig. 5.1 et Fig. 5.2) avec des ouvertures standards.

5.2 Protocole expérimental et conditions de mesures

La maison nous a été indiquée par M. Nicolas Meunier. Il était en train, avec son équipe, de réaliser des travaux de remise en état de l'extérieur de la maison.

Les mesures ont été réalisées pendant la matinée à l'aide de vélocimètres synchronisés (Fig. 5.3) et placés à différents endroits de la maison (rez-de-chaussée et étage).

5.3 Analyse succincte des résultats obtenus

Les graphes obtenus permettent de donner la première fréquence propre f_1 . D'après la figure 5.7, $f_1 = 6.75Hz$. On en déduit la période correspondante par simple inverse : $T_1 = \frac{1}{f_1} = 0.15s$. Toujours en observant les graphes, on s'aperçoit que le mode propre correspondant est à priori un mode de flexion dans le sens Est - Ouest.

Les spectres réglementaires de réponse d'une structure à un degré de liberté en fonction de l'amortissement sont donnés à la figure 5.8.

Ces spectres, présents dans les règlements, sont obtenus en soumettant un oscillateur simple de période T à un ensemble de sollicitations sismiques. En faisant varier la période



FIG. 5.1 – Vue de côté de la maison



FIG. 5.2 – Vue de la facade de la maison



FIG. 5.3 – Vélomètre posé au rez-de-chaussée de la maison

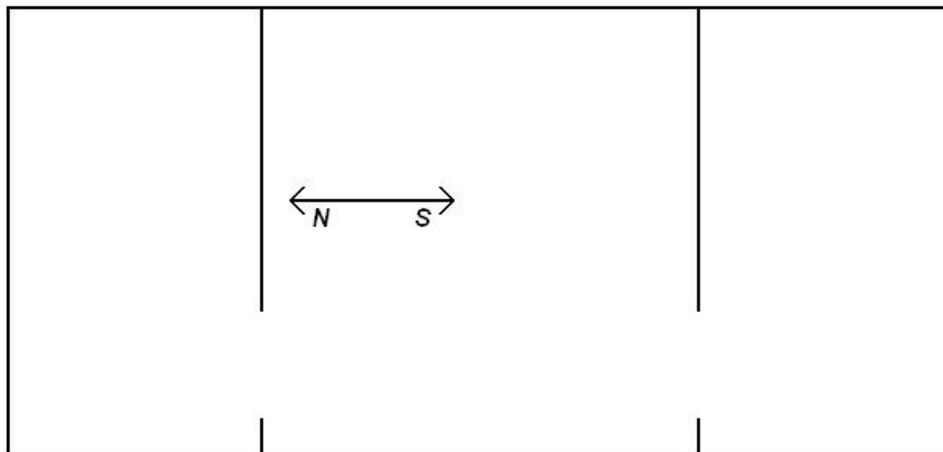


FIG. 5.4 – Schéma de la maison avec la direction Nord - Sud des appareils de mesure

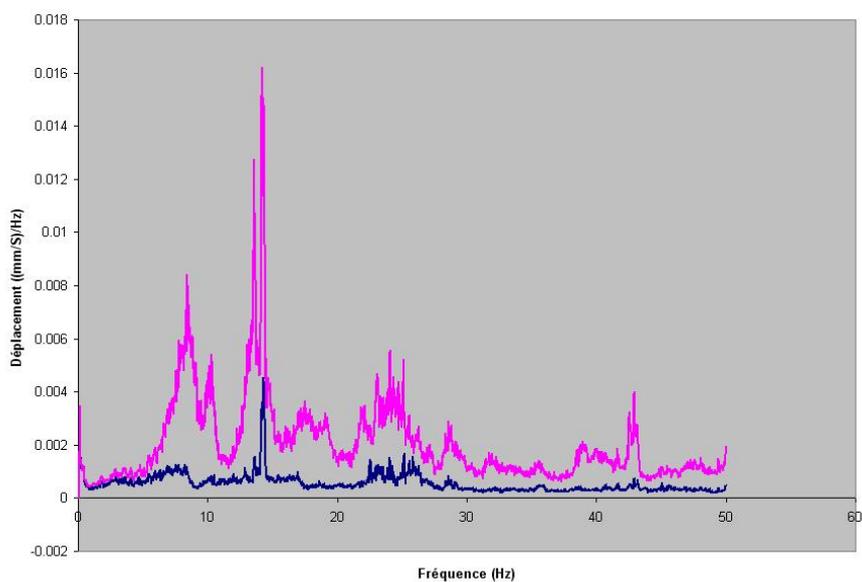


FIG. 5.5 – Graphe fréquences-déformations dans la direction Nord-Sud

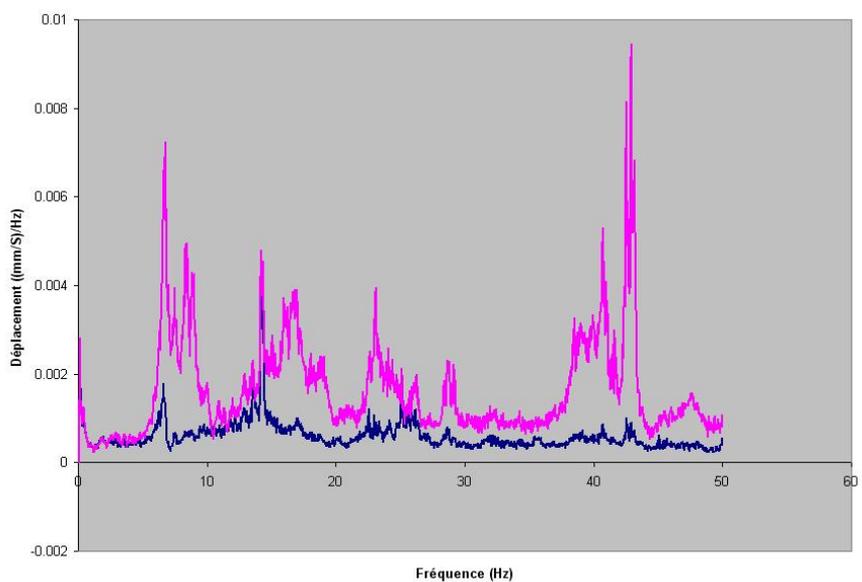


FIG. 5.6 – Graphe fréquences-déformations dans la direction Est-Ouest

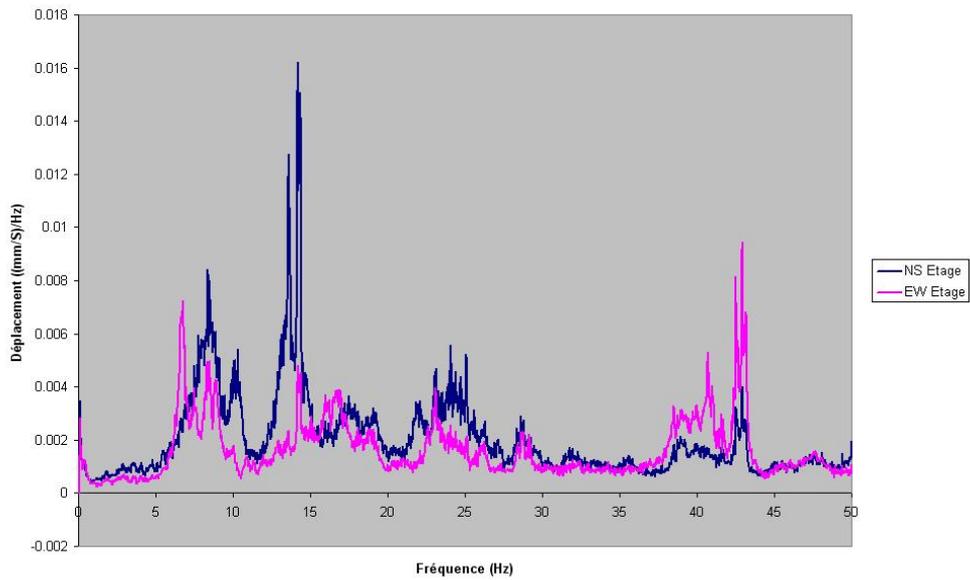


FIG. 5.7 – Graphe fréquences-déformations dans les 2 directions horizontales à l'étage

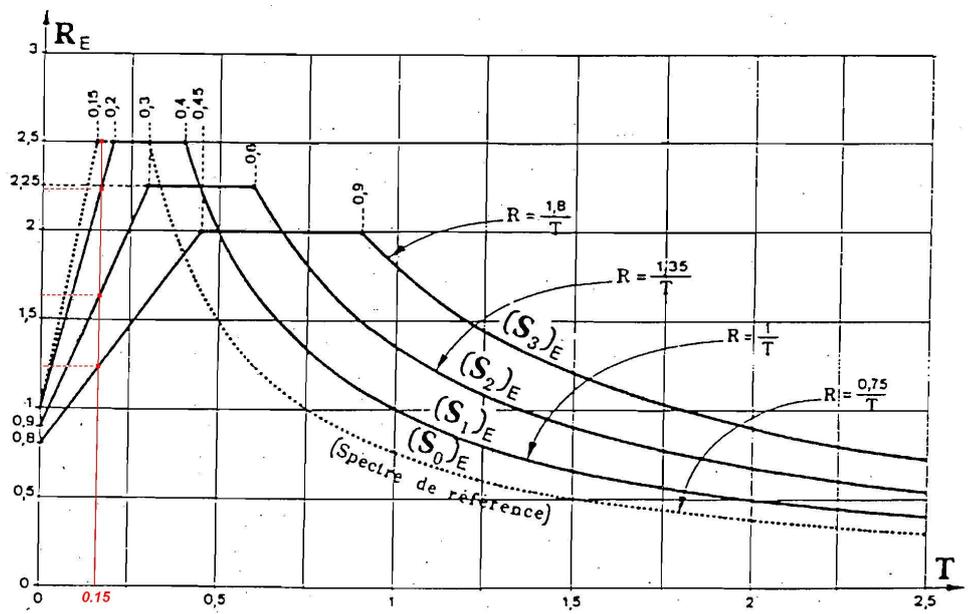


FIG. 5.8 – Réglementation

de l'oscillateur et en prenant la courbe enveloppe de toutes les réponses, on obtient, à l'amortissement correspondant, une courbe sur la figure 5.8. Ces courbes permettent de savoir si un bâtiment de période T et d'amortissement ξ amplifie ou non le mouvement imposé à la base.

Dans le cas présent, avec une première période propre de 0.15 s, l'amplification existe mais n'est pas maximale.

5.4 Conclusion

Il ne s'agit ici que d'un premier essai sur une maison. D'autres investigations doivent être menées pour tenter par exemple de relier certains paramètres (longueur des murs, épaisseur des murs,...) aux fréquences obtenues expérimentalement.

De plus, la maison est ici considérée comme un oscillateur à un seul degré de liberté mais la plupart des habitations sont composées de plus d'un étage. D'autres méthodes d'analyse peuvent être envisagées comme la méthode push-over qui consiste à appliquer à un modèle mathématique d'une structure, un déplacement correspondant au plus grand déplacement subi par la structure lors d'un séisme et à en déduire les modes d'endommagements.

Conclusion générale

Le travail effectué

Dans les zones régulièrement affectées par les séismes, les populations locales ont su sélectionner au fil du temps les solutions architecturales les plus efficaces sous un tremblement de terre et faisant le meilleur usage des ressources locales.

Par manque de savoir scientifique, ces solutions cèdent progressivement leur place à des matériaux et des savoir-faire plus industrialisés. Ceci prive parfois les populations locales de solutions constructives plus adaptées au contexte géographique, économique et social du lieu.

L'étude et la compréhension des cultures sismiques locales pourrait, aujourd'hui, permettre d'envisager d'autres approches de construction parasismique que celles promues aujourd'hui.

Le pisé est un matériau local encore mal connu mais très utilisé en Europe et dans les pays en voie de développement. A partir d'une étude bibliographique sur les cultures sismiques locales, quelques systèmes constructifs parasismiques performants, très répandus dans le bassin méditerranéen, peuvent être mis en avant.

A partir d'un essai en laboratoire, nous avons pu montrer que le pisé est un matériau au comportement plastique mais qu'il est possible de déterminer un module élastique sous une contrainte donnée. Le traitement d'un essai dynamique réalisé in-situ sur un mur en pisé permet d'obtenir, via une modélisation éléments finis, un module élastique. Afin de valider ou non cette méthode de détermination in situ du module de Young, les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus grâce à la théorie des poutres de Timoshenko.

Comme on l'a vu, de nombreux facteurs influent sur les valeurs des fréquences propres. En effet, elles dépendent de la géométrie du matériau (cf. Fig. 3.16), des caractéristiques de celui-ci (teneur en eau, isotropie,...) et du niveau de contrainte appliqué. Les modélisations utilisées ici, ne sont a priori pas suffisamment complètes pour donner des résultats en accord mais elles permettent de donner une première approximation de la valeur module de Young et peuvent être complétées par d'autres essais ou des modélisations plus poussées.

Dans cette optique, une approche par homogénéisation du matériau pisé a été menée. Les résultats théoriques ont été comparés à un essai dynamique en laboratoire et à

une modélisation éléments finis. Il ressort de cette confrontation que l'approche par homogénéisation donne des résultats satisfaisants par rapport aux conclusions obtenues par les essais in-situ.

La suite à donner

Afin de développer les connaissances scientifiques sur les matériaux locaux et les systèmes constructifs parasismiques ancestraux, l'approche développée ici, met en avant les difficultés à caractériser directement le matériau pisé en laboratoire puisqu'on ne connaît pas avec précision le niveau de contrainte appliqué. Par contre, une étude in situ peut donner, via des modélisations, directement le module élastique. De plus, la théorie de l'homogénéisation permet d'obtenir les caractéristiques du matériau pisé en tant que matériau orthotrope.

Par la suite, analyser et tester une disposition parasismique révélée par l'analyse des cultures sismiques locales : l'utilisation de planches de bois dans un mur en pisé, peut être une première façon de valider et de faire accepter les modes constructifs ancestraux. Intuitivement, on peut penser que dans ce système, le contact bois / pisé est une zone de frottement privilégiée. Le bois permet de fragmenter le mur en plusieurs parties horizontales qui peuvent se désolidariser sans entraîner l'effondrement du bâti. Cependant, il est difficile de dire quel sera le mode de ruine d'un tel système sans connaître un peu mieux les matériaux. Les planches de bois jouent-elles le rôle de fusibles sous sollicitation sismique ? Après avoir déterminé le coefficient de frottement entre le pisé et le bois, une étude théorique pour une géométrie définie, pourra être menée par analogie avec la maçonnerie (cohésion du pisé faible) et confrontée à une expérience réalisée sur plan incliné.

De plus, en ce qui concerne le matériau pisé lui-même, les essais grandeur nature sur des maisons peuvent être poursuivis et interprétés via des modélisations de structures et des méthodes actuelles de dimensionnement.

Annexe A

L'utilisation de la terre crue

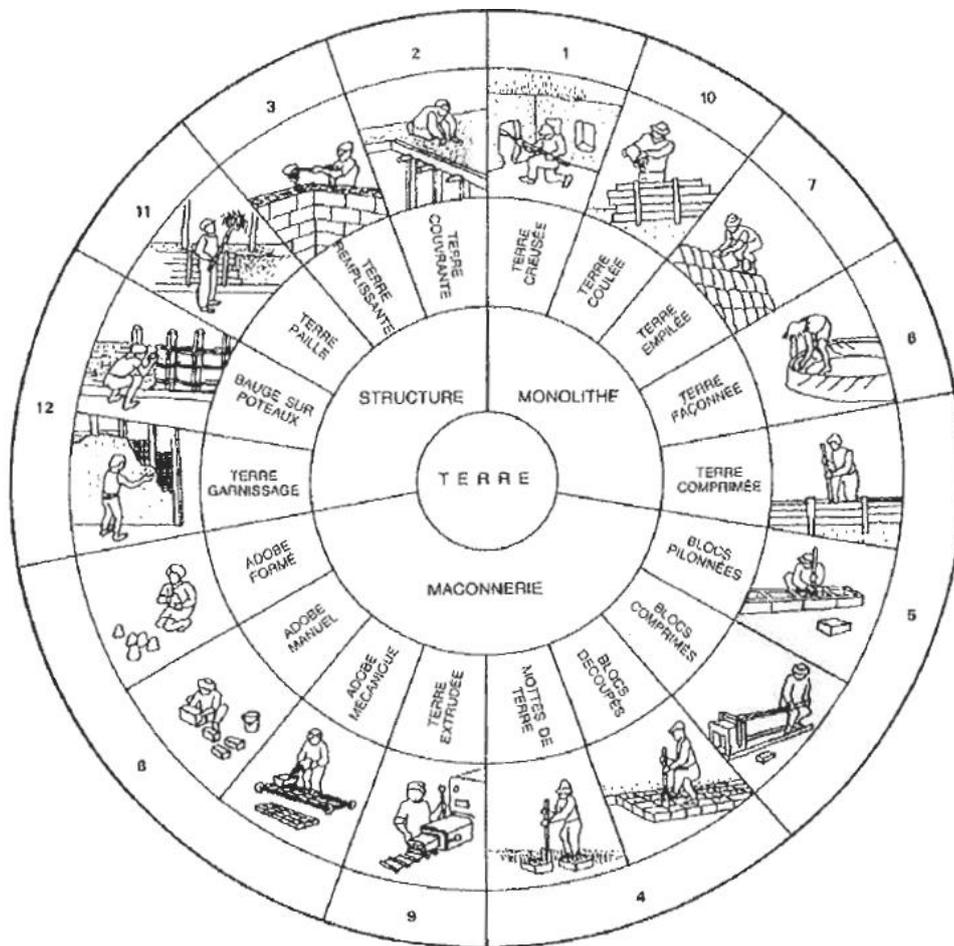


FIG. A.1 – Diagramme des utilisations de la terre crue, d'après [5]

Annexe B

Quelques compléments de sismologie

Il existe deux grands types d'ondes émises par un séisme :

- les **ondes de volume** qui se propagent dans la terre et qui se compose d'ondes P de compression et d'ondes S de cisaillement,
- les **ondes de surface** qui ne se propagent qu'en surface et qui se compose d'ondes L de cisaillement et d'ondes de Rayleigh.

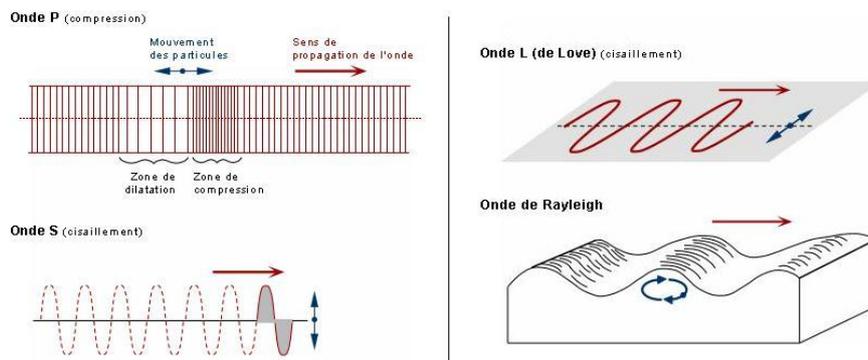


FIG. B.1 – Les différents types d'ondes

Dans une zone géographique, l'intensité d'un séisme est la mesure de l'ampleur des dégâts causés par un séisme. Plusieurs échelles ont été développées au cours du temps. L'échelle de Rossi-Forel est la plus ancienne et comportait 10 degrés d'intensité sismique. Elle fut remplacée par l'échelle de Mercalli qui compte 12 niveaux. Enfin, à partir de 1964, c'est l'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK) la plus utilisée car elle intègre la perception qu'a eu la population du séisme.

Degré	Dégâts et perception
I	Seuls les sismographes très sensibles enregistrent les vibrations.
II	Secousses à peine perceptibles ; quelques personnes au repos ressentent le séisme.
III	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un petit camion.
IV	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un gros camion.
V	Séisme ressenti en plein air. Les dormeurs se réveillent.
VI	Les meubles sont déplacés. Les gens ont peur.
VII	Quelques lézardes apparaissent dans les édifices.
VIII	Les cheminées des maisons tombent. Destruction des bâtiments fragiles.
IX	Les maisons s'écroulent. Les canalisations souterraines sont cassées.
X	Destruction des ponts et des digues. Les rails de chemin de fer sont tordus.
XI	Les constructions les plus solides sont détruites. Grands éboulements. Catastrophe.
XII	Les villes sont rasées. Bouversements importants de la topographie.

TAB. B.1 – L'échelle d'intensité MSK

Annexe C

Photos de la réalisation des échantillons de pisé



FIG. C.1 – Coffrage des échantillons



FIG. C.2 – Système hydraulique de la dame



FIG. C.3 – Réglage de la pression de la dame



FIG. C.4 – Réalisation d'une couche



FIG. C.5 – Opérations de décoffrage



FIG. C.6 – Echantillons décoffrés

Annexe D

Programme Matlab utilisé pour la transformation en ondelettes

Ce programme a été développé initialement par Stéphane Hans du LGM.

Annexe E

Séquence Maple pour le calcul des fréquences propres du mur en L

Bibliographie

- [1] MICHEL P. et POUDRU F., *Le patrimoine construit en terre en France métropolitaine*, 529-551, actes du colloque international "Le patrimoine européen construit en terre et sa réhabilitation", ENTPE, mars 1987.
- [2] MOREL J.-C., MESBAH A., OGGERO M. & WALKER P., *Building houses with local materials : means to drastically reduce the environmental impact of construction*, Building And Environment, 36 (2001) 1119-1126, Elsevier
- [3] WALKER P., KEABLE R., MARTIN J. & MANIATIDIS V., *Rammed earth, Design and Construction Guidelines*, BRE Bookshop, 2005.
- [4] TAYLOR P., FULLER R.J. & LUTHER M.B., *Energy Use and Thermal Comfort in a Rammed Earth Office Building*, Energy and Buildings (2007), doi :10.1016/j.enbuild.2007.05.013 .
- [5] GUILLAUD H. (CRATerre), *Construire en terre crue : Techniques anciennes et actuelles*, Revue Régionale Tiez Breiz - n°25 2006 - 9 p.
- [6] FERRIGNI F., HELLY B., MAURO A., MENDES VICTOR L., PIEROTTI P., RIDEAUD A., & TEVES COSTA P., *Ancient Buildings and Earthquakes*, Bari 2005, Edipuglia.
- [7] DUPONT DE DINECHIN M., MOLES O., *Technical guide for earthquake resistant buildings using local materials in Kaffal Ghar*, CRATerre-ENSAG 2006.
- [8] FERRIGNI F., *Mémoire sur la tenue des ouvrages "faits à l'ancienne" vis-à-vis des actions sismiques*, SCI TERROIR, mars 2000.
- [9] FERRIGNI F., HELLY B., RIDEAUD A., *Réduire la vulnérabilité du bâti par la récupération des cultures sismiques locales*, fascicule CUEBC, 1993.
- [10] BUI Q.B., *Stabilité des structures en pisé : durabilité, essais mécaniques et calcul de structure*, Rapport d'avancement de thèse, CNRS, ENTPE, mars 2007.
- [11] HANS S., *Auscultation dynamique de bâtiments et modélisation par homogénéisation, contribution à l'analyse de la vulnérabilité sismique*, Thèse INSA de Lyon, 2002.