



HAL
open science

Comportement dynamique de la Maison en Terre du campus de Grenoble : mesures par bruit de fond sismique et modèle éléments finis

Raphaëlle Grousseau-Troyes

► **To cite this version:**

Raphaëlle Grousseau-Troyes. Comportement dynamique de la Maison en Terre du campus de Grenoble : mesures par bruit de fond sismique et modèle éléments finis. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. dumas-01839830

HAL Id: dumas-01839830

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01839830v1>

Submitted on 16 Jul 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Travail de fin d'étude

pour le diplôme d'Ingénieur de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État

Année 2017-2018

Voie d'approfondissement : Génie Civil

Raphaëlle GROUSSON-TROYES

Comportement dynamique de la Maison en Terre du campus de Grenoble : mesures par bruit de fond sismique et modèle éléments finis

Organisme d'accueil :

Laboratoire 3SR



Soutenu le 28 juin 2018 à Lyon

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Stéphane HANS (ENTPE)
- Tuteur : Dominique DAUDON (3SR, UGA)
- Expert : Fabrice ROJAT (Cerema)

Notice analytique

AUTEUR			
Nom	GROUSSON-TROYES		
Prénom	Raphaëlle		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et localité	Laboratoire 3SR Bâtiment Galilée, 1270 rue de la piscine 38400 Saint Martin d'Hères		
Nom du Tuteur	Dominique DAUDON		
ANALYSE DU TFE			
Titre	Comportement dynamique de la Maison en Terre du campus de Grenoble : mesures par bruit de fond sismique et modèle éléments finis		
Title	Dynamic behavior of the Earthen House at the Grenoble campus: seismic background noise measurements and finite elements modelisation		
Résumé	<p>La Maison en Terre, construite en 1986, est issue d'une collaboration entre l'équipe CRATerre de l'Université Grenoble Alpes, l'école d'architecture (ENSAG) et l'IUT1 de Génie Civil. Dans le cadre du projet « Étudie les Constructions Locales Soutenables ! » (e-CoLos !), elle constituera à partir de septembre 2019 un outil pédagogique pour les étudiants de l'université. C'est donc dans ce contexte que j'ai réalisé une étude dynamique de la maison, en commençant par des mesures par bruit de fond sismique, puis en réalisant une modélisation numérique par éléments finis. Cela m'a permis d'obtenir les fréquences propres de vibration de la maison et d'analyser les facteurs qui influent sur celles-ci. J'ai également pu observer l'allure des déformées, l'influence de la toile de protection, ou encore la masse effective des modes.</p>		
Abstract	<p>The Earthen House of the Grenoble campus, built in 1986, is the result of a collaboration between the CRATerre team of the University Grenoble Alpes, the School of Architecture (ENSAG) and the IUT1 of Civil Engineering. As part of the project "Study Sustainable Local Constructions!"(E-CoLos!), it will constitute from September 2019 an educational tool for the university students. It is in this context that I realized a dynamic study of the house, starting with measurements by seismic background noise, then by creating a finite element numerical modeling. This allowed me to obtain the eigenfrequencies of the house and analyze the factors that affect them. I could also observe the deformation shape, the influence of the protective fabric, or the effective mass of the modes.</p>		
Mots-clés	Maison en terre crue, fréquence propre, bruit de fond sismique, modélisation, éléments finis		
Keywords	Earthen house, natural frequency, seismic background noise, modeling, finite elements		
Termes géographique	Saint-Martin-d'Hères, Université Grenoble Alpes, Isère, France		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	84	8 (17 pages)	34

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier la personne qui m'a accueillie pendant ce stage, Dominique DAUDON, chercheuse au laboratoire 3SR et enseignante à Phitem à Grenoble, pour son accueil, le temps qu'elle m'a consacré, sa confiance et ses conseils au quotidien.

Je remercie également les membres du jury, Stéphane HANS et Fabrice ROJAT, pour leur disponibilité et l'attention qu'ils porteront à l'égard de mon travail.

Je tiens à remercier Florence JOUSSELLIN, enseignante à l'UGA et chercheuse au LEGI, Yannick SIEFFERT, enseignant à l'UGA et chercheur au laboratoire 3SR, ainsi que toutes les personnes que j'ai pu rencontrer dans le cadre du projet e-CoLoS!, avec qui j'ai pu avoir des discussions toujours enrichissantes.

Un grand merci également à David El-Madhi BOUDJITI, doctorant au laboratoire 3SR, pour son aide précieuse concernant la modélisation numérique.

Enfin, je remercie Philippe GUEGUEN, chercheur à ISTerre, pour les conseils avisés qu'il m'a donnés pour l'analyse de mes résultats.

Sommaire

Notice analytique	3
Remerciements	5
Sommaire.....	7
Liste des illustrations	9
Introduction	11
1. Contexte du stage et de l'étude	13
1.1 Le projet e-CoLoS !.....	13
1.1.1 Description et objectifs du projet.....	13
1.1.2 Les porteuses du projet et les formations concernées.....	14
1.1.3 Le colloque Terra Education III	15
1.2 La Maison en Terre du campus de Grenoble	16
1.2.1 Une démonstration de l'intérêt des constructions en terre.....	16
1.2.2 Descriptif et propriétés de la maison	18
1.2.3 État actuel de la maison	20
1.3 Fréquences de résonance et effets de site à Grenoble.....	21
1.3.1 L'importance de la fréquence de résonance d'une structure.....	21
1.3.2 Sismicité locale	22
1.3.3 Spectre de réponse élastique et spectres de calcul	24
2. Essais expérimentaux sur la Maison en Terre	27
2.1 Le bruit de fond sismique et le micro-zonage	27
2.1.1 Méthodes d'auscultation des bâtiments.....	27
2.1.2 Le bruit de fond sismique.....	27
2.1.3 La méthode H/V pour le micro-zonage	29
2.2 Premiers essais dans le bâtiment 3SR	30
2.2.1 Présentation de la station Minishark	30
2.2.2 Essais dans le bâtiment 3SR.....	32
2.3 Mesures sur la Maison en Terre.....	37
2.3.1 Estimation manuelle de la fréquence propre.....	37
2.3.2 Mesures réalisées sur la maison.....	39

2.4	Autres expérimentations	42
2.4.1	Mesures sur la table vibrante du laboratoire 3SR.....	42
2.4.2	Mesures sur la passerelle de l'Île d'Amour.....	44
3.	Modélisation numérique de la Maison en Terre.....	47
3.1	Modélisation de la géométrie avec Robot puis Code_Aster.....	47
3.1.1	Modélisation sur Revit et Robot Structural Analysis	47
3.1.2	Modélisation avec Code_Aster et Salome Meca.....	48
3.2	Étude statique et modale de la Maison en Terre	49
3.2.1	Étude statique brève de la maison	49
3.2.2	Analyse modale de la maison seule.....	50
3.3	Étude de l'influence de la toile de protection	55
3.3.1	Étude statique de la toile.....	55
3.3.2	Analyse modale de la maison avec les actions extérieures	59
3.3.3	Analyse modale de la toile.....	60
3.4	Interprétation et limites des résultats.....	61
	Conclusion.....	64
	Références bibliographiques.....	65
	Annexes.....	68
	Annexe A : Liste des personnes concernées par le projet e-CoLoS !.....	68
	Annexe B : Programme du colloque Terra Education III.....	69
	Annexe C : Données pour le calcul des spectres élastiques	72
	Annexe D : Manuel d'instruction pour la station Minishark et le logiciel Geopsy	73
	Annexe E : Courbes FFT des essais avec les briques.....	76
	Annexe F : Spectres de Fourier des mesures réalisées sur la Maison en Terre	79
	Annexe G : Spectres de Fourier des mesures réalisées sur la passerelle de l'Île d'Amour	81
	Annexe H : Caractéristiques des maillages créés	83
	Annexe I : Analyse des résultats de l'étude statique de la toile	84

Liste des illustrations

Figure 1 : Extrait de la plaquette IDEX des projets retenus dans la catégorie "Transformation pédagogiques et plateformes Learning-by-doing", Session 2017/2018	14
Figure 2 : Posters présentés lors du colloque Terra Education III. Création personnelle	16
Figure 3 : Construction des coupoles du toit de la maison	17
Figure 4 : 21 Novembre 1986, la maison est finie ! Source : Patrice DOAT	17
Figure 5 : Tamisage de la terre par les étudiants	17
Figure 6 : Maquette à l'échelle ½ à l'ENSAG	17
Figure 7 : La Maison en Terre aujourd'hui. Production personnelle	18
Figure 8 : Schéma de la maison en terre (ou maison 24h). Source : DCE 1988	19
Figure 9 : Traces d'eau sur la façade Sud de la maison. Production personnelle	20
Figure 10 : Modèle numérique sous Robot (avec charges).....	21
Figure 11 : Modèle surfacique de la toiture sous AutoCad.....	21
Figure 12 : Le pont de Tacoma aux États-Unis. Source : Google Images.....	22
Figure 13 : Dégâts dus au séisme de Corrençon en 1962. Source : ina.fr	23
Figure 14 : Schéma illustrant l'effet de site géologique. Production personnelle	23
Figure 15 : Fréquences de résonance déterminées par la méthode H/V.....	24
Figure 16 : Fréquences de résonance du bassin mesuré à partir du bruit de fond sismique.....	24
Figure 17 : Spectre élastique et spectre de calcul pour la Maison en Terre. Production personnelle	25
Figure 18 : Spectres de calcul avec différents amortissements pour la Maison en Terre. Production personnelle	26
Figure 19 : Schéma des méthodes d'auscultation des bâtiments. Production personnelle.....	27
Figure 20 : Schéma récapitulatif de la répartition des sources par gamme de fréquence. Production personnelle	28
Figure 21 : Organigramme du groupe KEAS. Source : keas-group.com.....	30
Figure 22 : Matériel de mesure. Production personnelle	31
Figure 23 : Quatre essais avec la brique en terre comprimée. Production personnelle	32
Figure 24 : Maillage de la brique avec Salome Meca. Production personnelle	33
Figure 25 : Fichier de commande Code_Aster pour l'analyse modale de la brique. Production personnelle	34
Figure 26 : Allure des déformées pour les 5 premiers modes propres. Production personnelle.....	34
Figure 27 : Signal et transformées de Fourier d'un essai réalisé dans le bâtiment 3SR. Production personnelle	35
Figure 28 : Spectres de Fourier des quatre essais dans le bâtiment 3SR. Sur les courbes du bas apparaissent le spectre moyenné et les écarts-types. Production personnelle.....	35
Figure 29 : Courbe H/V de l'ensemble des mesures réalisées à l'extérieur du bâtiment 3SR. Production personnelle ...	36
Figure 30 : Simplification de la géométrie de la maison. Source : rapport DESCHAMPS et al.	37
Figure 31 : Formule de la rigidité d'un mur. Source : rapport DESCHAMPS et al.	37
Figure 32 : Détermination de la rigidité d'un mur en maçonnerie. Source : Dimensionner les ouvrages en maçonnerie de Marcel HUREZ	38

Figure 33 : Capteur utilisé pour les mesures. Production personnelle	40
Figure 34 : Mesures réalisées sur la Maison en Terre. Production personnelle.....	40
Figure 35 : Spectre moyen des mesures réalisées sur la Maison en Terre. Production personnelle	41
Figure 36 : Spectre H/V de la mesure au sol près de la maison. Production personnelle.....	41
Figure 37 : Table vibrante au laboratoire 3SR. Source : www.univ-grenoble-alpes.fr	42
Figure 38 : Mesure sur la table vibrante. Production personnelle.....	42
Figure 39 : Spectres de Fourier des essais sur la dalle (à gauche) et sur la table vibrante (à droite). Production personnelle 43	43
Figure 40 : Courbe H/V de la mesure réalisée sur la dalle sur laquelle est posée la table vibrante. Production personnelle 44	44
Figure 41 : Mesures réalisées sur la passerelle de l'Île d'Amour. Production personnelle	44
Figure 42 : Identification des pics de fréquence sur le spectre au point C. Production personnelle	45
Figure 43 : Rappel de l'allure des premiers modes. Source : Google images	45
Figure 44 : Spectres des signaux verticaux quasi-stationnaires. Production personnelle	46
Figure 45 : Modélisation de la maison sous Revit et Robot. Production personnelle	47
Figure 46 : Maillage de la maison. Production personnelle	48
Figure 47 : Déplacements (en haut) et contraintes (en bas) de la maison. Production personnelle	49
Figure 48 : Contraintes dans l'un des poteaux centraux. Production personnelle	50
Figure 49 : Fréquences et masses effectives modales des 7 premiers modes de la maison. Production personnelle	50
Figure 50 : Déformées des 5 premiers modes propres de la maison. Production personnelle	51
Figure 51 : Masses effectives cumulative selon le pourcentage de modes retenus. Production personnelle	52
Figure 52 : Caractéristiques des maillages réalisés. Production personnelle.....	52
Figure 53 : Valeur des cinq premières fréquences propres en fonction du maillage. Production personnelle.....	53
Figure 54 : Influence de la masse volumique et du coefficient de Poisson du matériau sur les cinq premières fréquences propres. Production personnelle.....	53
Figure 55 : Influence du module de Young sur les cinq premières fréquences propres. Production personnelle	54
Figure 56 : Maillage de la toile de protection. Production personnelle.....	56
Figure 57 : Schématisation des surcharges dues au vent et à la neige. Production personnelle.....	58
Figure 58 : Schématisation des conditions aux limites de la toile. Production personnelle	58
Figure 59 : Déplacements, contraintes et forces selon les cas étudiés. Production personnelle.....	59
Figure 60 : Déformation de la toile sous son poids propre. Production personnelle.....	59
Figure 61 : Répartition des charges sur le tube diagonal. Production personnelle	59
Figure 62 : Influence des actions extérieures sur les fréquences propres. Production personnelle	60
Figure 63 : Fréquences propres de la toile en fonction des actions extérieures. Production personnelle	60
Figure 64 : Les 5 premiers modes de la toile (de gauche à droite et de haut en bas). Production personnelle	61

Introduction

La terre crue, sous forme de brique d'adobe ou de pisé, est l'un des matériaux de construction les plus anciens, avec des cas documentés d'utilisation de briques de terre en Mésopotamie vers 10.000 avant J.-C. (HEATHCOTE, 1995, cité par COSTA et al., 2018). Elle est aujourd'hui encore en usage dans de nombreux pays, et l'on estime qu'environ 30% de la population mondiale vit dans des bâtiments en terre (COSTA et al., 2018). Cependant, depuis les dernières décennies, avec l'arrivée des matériaux de construction industrielle, l'utilisation de terre crue s'est fortement amoindrie. Aujourd'hui, ce matériau fait l'objet d'un nouvel intérêt en raison de ses propriétés avantageuses, telles que son utilisation simple et économique et son respect de l'environnement, en particulier dans les pays en développement où les coûts des matériaux sont parfois plus importants que ceux liés à la main d'œuvre, et où d'autres matériaux et technologies de construction ne sont pas aisément disponibles.

En plus de leur faible coût et de leur technique de construction relativement simple, les structures en terre ont également d'excellentes propriétés thermiques et acoustiques. Mais, du fait de leurs murs lourds avec un comportement fragile, les constructions traditionnelles répondent en revanche très mal aux secousses sismiques, et peuvent subir de graves dommages structurels, jusqu'à l'effondrement de la structure (BLONDET et VILLA GARCIA). Néanmoins, en observant les dommages causés par le séisme du 17 mai 1970 au Pérou et ceux plus récents au Chili, on remarque que certaines maisons en terre ont mieux résisté que d'autres (GIOVANNI et SEDILI, 2012, Amanda RIVERA VIDAL à Terra Education III). Cela montre qu'en respectant certaines préconisations de construction (comme la géométrie et la composition de la brique par exemple), les structures en briques de terre crue peuvent se comporter de manière convenable face aux sollicitations d'un séisme. Lors de la conférence Terra Education III, Francisco Javier SORIA LOPEZ explique que le problème ne vient pas du matériau, mais de la manière de l'utiliser.

La Maison en Terre du Campus de Grenoble a été construite il y a 30 ans en un week-end par les architectes du laboratoire CRAterre¹. Elle est constituée de briques en terre crue (adobe), comprimées et liées avec un liant de terre et de chaux. À l'époque de sa construction, la maison en terre n'avait pas vocation à perdurer, ce qui fait qu'aujourd'hui, peu de données sont disponibles concernant les techniques et matériaux utilisés, ou les calculs réalisés lors de sa conception. Or la ville de Grenoble, située au nord des Alpes, est une ville à sismicité moyenne avec des séismes historiques importants, et les sismologues estiment qu'un séisme de magnitude 6 est possible partout dans les Alpes (MICHEL, 2007). Dans ce contexte, il serait intéressant d'étudier le comportement qu'aurait la maison en terre si

¹ Association et Laboratoire de recherche de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, dans les domaines des Cultures Constructives et Développement Durable

un séisme se produisait avec un épicentre proche de la ville de Grenoble. Ainsi, je me suis intéressée aux problématiques suivantes :

Quelles sont les caractéristiques modales de la Maison en Terre, en particulier ses fréquences propres de vibration ? Comment les déterminer ? Quels sont les paramètres qui influencent les modes propres ? Quelle est finalement la vulnérabilité de la Maison en Terre ?

Pour répondre à ces questions, une première partie introduira d'abord le contexte du projet, avec une présentation du projet e-CoLos! dans lequel s'inscrit ce stage, de la Maison en Terre étudiée et du contexte sismique de la région Grenobloise. Puis, une seconde partie présentera la technique de mesure par bruit de fond sismique ainsi que les essais expérimentaux réalisés. Et enfin, la dernière partie concernera la modélisation de la Maison en Terre par éléments finis, avec une comparaison des résultats obtenus expérimentalement et numériquement.

1. Contexte du stage et de l'étude

1.1 Le projet e-CoLoS !

1.1.1 Description et objectifs du projet

Aujourd'hui, il existe beaucoup de ressources pédagogiques sur les techniques et les matériaux à haute valeur ajoutée dans la construction (béton, métal, labels HQE et BBC, etc.) mais peu sur des techniques de construction avec une démarche plus frugale, comme l'utilisation de la terre sous différentes formes. Certaines formations à Grenoble sont centrées sur le renouveau du monde de la construction (UE Constructions Biosourcées, Management Environnemental dans le Master 2 GC...), mais il y a une nécessité de créer des ressources pédagogiques permanentes pour pouvoir intégrer dans ces formations l'étude de constructions vernaculaires soutenables, telles que la Maison en Terre du campus grenoblois, toujours en bon état après 30 ans de vie.

L'un des objectifs principaux du projet e-CoLoS! (**É**tudie les **C**onstructions **L**ocales **S**outenables !) est donc de mettre en œuvre sur la Maison en Terre un système d'acquisition de données connecté. Il s'agira par exemple d'installer des capteurs d'énergie solaire et de luminosité, une station météo, des sondes pour la Qualité de l'Air Intérieur (mesure du CO₂, des COV (note), de l'humidité, etc.) et pour les particules fines (PM₁₀, PM_{2.5}) ou encore des capteurs de consommation. L'idée est de s'aligner sur la norme RT2020 et de comptabiliser toutes les consommations, c'est-à-dire prendre en compte les mêmes usages que la RT2012 (refroidissement, chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage et auxiliaires), avec en plus les consommations des appareils ménagers et électroménagers.

Toutes ces données seront ensuite accessibles et consultables à distance sur internet (via un serveur proxy) en se connectant avec un login. Les étudiants, les enseignants et les chercheurs pourront alors consulter ces bases de données ainsi que des *dashboards*, ou encore naviguer dans la maison et accéder aux différents capteurs en réalité virtuelle (idée encore en développement). La but est de faire de la Maison en Terre un objet pédagogique pour les formations du Génie Civil et d'Architecture, autant dans les domaines de la thermique et de l'énergétique que dans le secteur de la mécanique.

Dans cette même démarche, il existe déjà la salle labellisée "BBC²" de l'IUT GCCD³, instrumentalisée et accessible aux étudiants depuis quelques années. Avec la maison en terre, ces deux bâtiments constituent des ressources idéales pour de futures animations pédagogiques. Deux autres bâtiments devraient ensuite être intégrés sur la même web application :

² Bâtiment Basse Consommation

³ Génie Civil Construction Durable

- Le Velux Lab à Politecnico di Milano, qui est un cas d'étude de bâtiment à haute efficacité énergétique. Le bâtiment, entièrement construit avec des systèmes de construction multicouches, atteint d'excellentes valeurs de consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement ainsi que pour l'éclairage. Il possède déjà une série de capteurs, mais les données ne sont pas encore accessibles sur internet.
- Le service des sports du Campus de Milan, qui est un module réalisé en bois et qui serait donc un objet d'étude intéressant. Sa construction étant relativement récente, il n'est pas encore instrumenté.

L'application web devrait donc regrouper un réseau de plusieurs types de bâtis, afin de pouvoir les étudier, les comparer, etc., à l'image du site internet du réseau ROMMA⁴, qui permet un accès à un ensemble de données en temps réel.

1.1.2 Les porteuses du projet et les formations concernées

Le projet e-CoLos! est un projet financé par l'IDEX⁵ (note : Initiatives d'Excellence) Université Grenoble Alpes (UGA), dans le cadre des appels à projets « Transformations pédagogiques et "Learning-by-doing" ». Il est porté par Dominique DAUDON⁶ et co-porté par Florence JOUSSELIN⁷. Un collectif d'intervenants a été constitué pour le pilotage et le suivi du projet, mais aussi pour constituer des appuis dans les domaines dont les membres sont compétents. Il comprend à la fois des enseignants des formations concernées, des experts d'investissements d'avenir labellisés, des membres du service

● PLATEFORMES ● INTERNATIONALISATION ● PÉDAGOGIE ACTIVE ● PÉDAGOGIE NUMÉRIQUE

e-CoLoS !

Étudie les Constructions Locales Soutenables !

L'instrumentation énergétique et mécanique connectée de la «Maison en Terre», a pour ambition de développer l'esprit «soutenable» dans les formations des acteurs de la construction du futur. Construite il y a 30 ans en rupture avec les cultures constructives traditionnellement enseignées, elle initie un réseau de petits bâtiments instrumentés franco-italiens de formation innovante à la diversité du bâti soutenable du futur.

QUELLE TRANSFORMATION POUR LE SITE ?

Enseignement numérique interactif et coopération structurante architecture-ingénierie, enseignement d'une soutenabilité raisonnée du bâti, constitution d'une base de données énergétiques en service et d'un réseau d'acteurs de la construction soutenable



Financement IDEX
73 650 € (5 ans)

• Porteurs du projet : Dominique DAUDON, Florence JOUSSELLIN, UGA - UFR PHITEM
 • Partenaires : Amiquàl4home, UGA - ENEPS, UGA - IUT GCCD, UGA - UFR PHITEM, AE&CC-CRATerre, ENSAC, amàco, CAESUG, UGA - DAPAL, École Polytechnique de Milan

Figure 1 : Extrait de la plaquette IDEX des projets retenus dans la catégorie "Transformations pédagogiques et plateformes Learning-by-doing", Session 2017/2018

⁴ Réseau d'Observation Météo du Massif Alpin (<http://romma.fr>)

⁵ Initiatives d'Excellence

⁶ Ingénieure Génie Civil INSA, Maître de conférence à l'UGA depuis 1992 (UFR Méca puis Phitem), Recherche au laboratoire 3SR en modélisation numérique des risques naturels et des constructions

⁷ Ingénieure INPG, Maître de conférence à l'IUT 1 Département Génie Civil, Initiatrice de l'instrumentalisation de la salle BBC de l'IUT

technique de l'UGA (DAPAL), et des utilisateurs de la Maison en Terre. Une liste des personnes impliquées dans ce projet est disponible en annexe A.

De nombreuses formations pourront profiter du réseau mis en place :

- La filière Génie Civil de Phitem
- L'école d'Architecture de Grenoble
- L'IUT Génie Civil de Grenoble
- Des "Initiatives d'excellence en formations innovantes" (IDEFI) : l'Atelier Matières à Construire (AMACO) et l'École Nationale de l'Enseignement Professionnel Supérieur (ENEPS)
- L'« Equipements d'Excellence » (EQUIPEX) Amigual4Home (habitat intelligent)
- Un Master international "Building & Architectural Engineering" du Politecnico Milano

Au total, ce sont plusieurs centaines d'étudiants concernés, dont environ 450 dans les formations de Génie Civil de l'UGA.

Des étudiants participeront également au processus de création de ressources pédagogiques sur la durée du projet, à travers des stages, des projets pluridisciplinaires, etc. Par exemple, la détermination des capteurs thermiques à installer et de la méthode d'installation a été confiée à un stagiaire du DUT Mesures Physiques de Grenoble.

1.1.3 Le colloque Terra Education III

Terra Éducation III est un colloque international qui s'est déroulé le 4 et 5 Juin 2018 à Grenoble, à l'occasion des 20 ans de la Chaire UNESCO Architecture de terre, cultures constructives et développement durable, et dans le cadre du programme WHEAP (World Heritage Programme on Earthen Architecture) de l'UNESCO. Au programme, des présentations et des débats afin de faire un état des dynamiques actuelles en termes d'enseignement supérieur, de formation professionnelle, de recherche et de diffusion des savoirs en matière d'architecture de terre (programme complet disponible en annexe B).

Les nombreux participants, venus d'Europe (France, Espagne, Suisse, République Tchèque, Allemagne...) d'Amérique du Sud (Pérou, Chili, Colombie, Mexique...) mais aussi d'Afrique (Angola, Congo, Burkina Faso...) ou encore d'Asie (Chine), ont pu partager leurs points de vue et leurs expériences sur l'évolution de la reconnaissance de la construction en Terre dans le monde. Ils ont présenté leurs projets actuels et futurs en termes de formations, que ce soit pour des étudiants, des professionnels, des habitants locaux ou du grand public. Leur objectif commun est de toucher et d'impliquer le plus d'acteurs possible dans la démarche d'acceptation, de maintien et d'évolution des constructions vernaculaires soutenables.

A cette occasion, Dominique DAUDON a été sélectionnée pour présenter le projet e-CoLoS!, et à la fin de la deuxième journée, un pot a été organisé autour de la maison en terre pour fêter son 32ème anniversaire et marquer l'inauguration du projet e-CoLoS! (officiellement lancé le 5 juin 2018). Pour cette occasion, j'ai créé avec l'aide de Dominique deux posters qui présentent l'histoire de la construction de la Maison en Terre ainsi que le projet e-CoLoS!.



Figure 2 : Posters présentés lors du colloque Terra Education III. Création personnelle

1.2 La Maison en Terre du campus de Grenoble

1.2.1 Une démonstration de l'intérêt des constructions en terre

À la veille de l'année internationale du logement des sans-abri, proclamée par l'Assemblée générale des Nations Unies pour 1987, la Maison en Terre du campus grenoblois voit le jour en un temps record. Commanditée par l'équipe CRATerre de l'Université des Sciences (aujourd'hui Université Grenoble-Alpes), la maison est construite par les stagiaires de l'Association nationale pour la Formation Professionnelle des Adultes (AFPA) de Saint-Priest en seulement 24 heures (3 fois 8 heures), entre le 19 et le 21 novembre 1986.



Figure 3 : Construction des coupoles du toit de la maison
Source : Patrice DOAT



Figure 4 : 21 Novembre 1986, la maison est finie !
Source : Patrice DOAT

Issue d'un projet pédagogique rassemblant plusieurs formations, elle respecte un cahier des charges établi par l'institut Dolomieu de Géologie-Minéralogie et le Département de Génie Civil de l'IUT 1 (MORIN, 1987). L'école d'architecture de Grenoble (ENSAG) a préalablement réalisé des modèles réduits (à l'échelle 1/2) dans leur hall d'expérimentation, afin de vérifier la faisabilité de la maison, et de mettre au point le processus de construction.



Figure 5 : Tamisage de la terre par les étudiants
Source : Patrice DOAT



Figure 6 : Maquette à l'échelle 1/2 à l'ENSAG
Source : Patrice DOAT

La terre utilisée a été prélevée directement sur place par les étudiants, et les briques ont été élaborées dans l'atelier de « briqueterie » installé pour l'occasion sur le campus. Le but de l'opération était de valoriser au maximum l'utilisation de la brique de terre, avec un logement bâti entièrement avec des briques de terre comprimée et stabilisée au ciment pour plus de résistance.

Au même moment, une autre maison était construite avec une technique similaire à Kigali au Rwanda. Cette opération double avait alors un but scientifique, mais également politique. Il s'agissait de montrer que la terre crue est un matériau qui pourrait alléger les coûts de construction, apportant ainsi des solutions nouvelles aux problèmes de l'habitat, dans des environnements aussi différents que l'Europe

ou l'Afrique (CAPORAL, 1987). Ils ont démontré que l'on peut construire un habitat durable et économique en peu de temps, ce qui est notamment intéressant dans un contexte post-catastrophe.

Deux ans après sa construction, une toile PVC a été ajoutée pour protéger la maison des intempéries, ainsi qu'un raccordement aux réseaux d'eau et d'électricité, permettant l'installation d'éclairages, de chauffage et de sanitaires. Les oculus présents sur les coupoles ont été bouchés par du mortier ou à l'aide d'un chapeau en plastique, et les menuiseries extérieures ont été remplacées, avec l'ajout de grilles de protection. Plusieurs services universitaires s'y sont succédés, et aujourd'hui, c'est le Comité d'Action Sociale des Universités de Grenoble (CAESUG) qui occupe les locaux depuis 2017.



Figure 7 : La Maison en Terre aujourd'hui. Production personnelle

1.2.2 Descriptif et propriétés de la maison

La Brique (ou Blocs) de Terre Comprimée (BTC) est la version moderne de l'adobe. Auparavant, la terre était compactée dans un moule à l'aide d'un pilon, ou en rabattant un couvercle très lourd dans le moule. Aujourd'hui, la terre est comprimée à l'aide de presses, en grande évolution depuis maintenant quelques décennies, qui permettent plus de régularité dans l'élaboration des briques. L'utilisation de presse rend possible un plus grand nombre de contrôles de qualité, et permet de 'normaliser' et commercialiser les produits. Par ailleurs, la terre crue présente un intérêt écologique évident, puisque la consommation en énergie pour fabriquer une brique stabilisée au ciment est seulement de 0.05 kWh , contre 2 kWh pour une brique de terre cuite de la même taille (DOAT et al., 1979) et 0.76 kWh pour le même volume en béton⁸. De plus, les coûts sont minimisés dans ce type de construction, car des matériaux locaux peuvent être employés. Certaines précautions sont tout de même requises,

⁸ Source : écoconso "L'énergie grise des matériaux de construction" fiche conseil n°155, décembre 2013

notamment pour la composition de la terre, sa granulométrie ou encore sa teneur en argile (COSTA et al., 2018). On peut également noter que le retrait associé à la construction de grandes structures est évité, puisqu'il s'effectue lors du séchage de la brique (DOAT et al., 1979 et COSTA et al., 2018). Enfin, la stabilisation de la terre par l'addition de ciment permet d'améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité, mais amoindrit les bénéfices environnementaux de la terre crue, puisque sa recyclabilité après démolition est alors limitée (BRUNO et al., 2015).

La Maison a été construite avec des Briques de Terre Comprimée, stabilisée à 7% avec du ciment, et des joints en mortier. Cependant, nous n'avons pas d'information sur la terre utilisée (granulométrie, densité, etc.) - hormis le fait qu'elle a été prélevée sur place - ni sur la presse utilisée pour compacter la terre et former les briques.

Elle a une surface habitable de 50 m^2 , sur un seul niveau, avec une hauteur moyenne sous plafond de 2.95 m , des murs d'une épaisseur de 29 cm et une toiture d'une épaisseur de 15 cm . Elle compte également quatre portes (une sur chaque mur extérieur) et cinq fenêtres. Elle est divisée en quatre zones autour d'un îlot central où se rejoignent quatre poteaux soutenant quatre coupoles de taille différente. Malgré sa géométrie singulière, elle présente une symétrie selon l'un de ses axes diagonaux (celui reliant la plus grande et la plus petite coupole). Elle repose sur une dalle en béton, et un revêtement linoléum a été posé à l'intérieur. Une toile tendue a été installée deux ans après la construction de la maison. Elle est supportée par des mâts en acier qui reposent sur le sol aux quatre coins et sur deux poteaux centraux appuyés sur la maison.

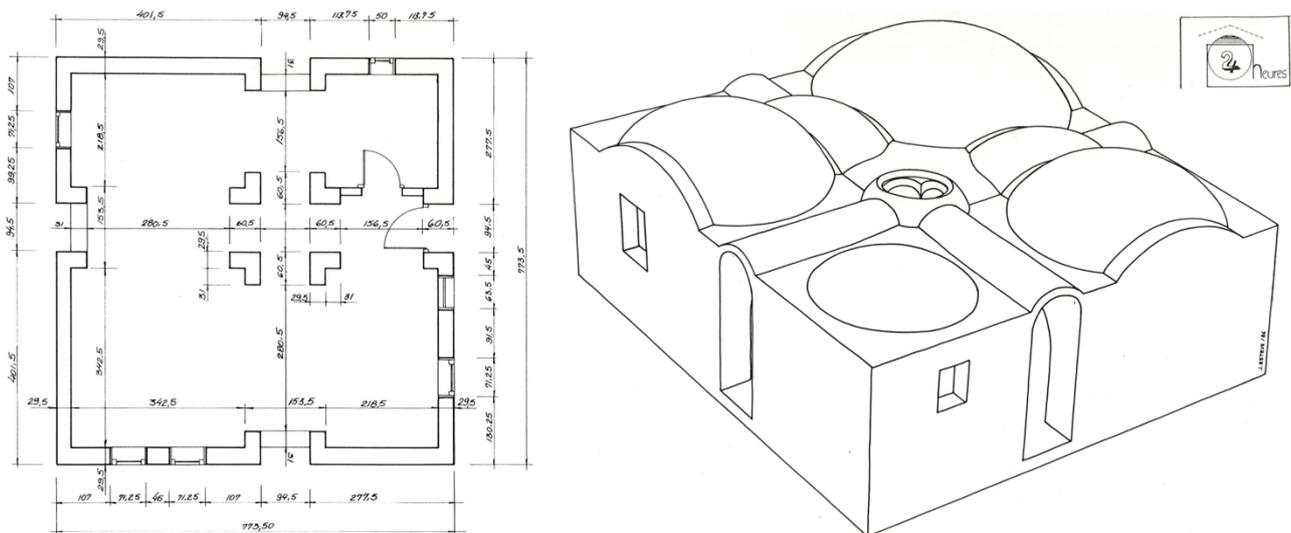


Figure 8 : Schéma de la maison en terre (ou maison 24h). Source : DCE 1988

1.2.3 État actuel de la maison

En mai 2016, un groupe d'étudiants de l'UGA (PLAN, BOURDIER, SOYEUX, DEVUN) a réalisé un diagnostic structurel de la Maison en Terre. Avant de dresser un bilan de l'état de vieillissement de la maison, ils ont identifié les principales causes de dégradations des briques en terre crue. Il s'agit tout d'abord de l'eau (gel, pluie, remontée d'humidité), qui va venir détériorer et éroder la terre. Pour résister, il faut que la structure ait de "bonnes bottes et un bon chapeau", c'est-à-dire des fondations étanchéifiées au dessus du niveau du sol, et une toiture débordante qui protège les façades et le plafond des intempéries et des rayonnements du soleil, qui vont venir craqueler la terre. Les facteurs biologiques (végétation, animaux, insectes, etc.) peuvent également altérer la terre crue. En revanche, si les briques sont bien protégées de l'humidité, les risques sont moindres. Enfin, certaines détériorations d'une structure en brique de terre peuvent être à l'origine de faiblesses mécaniques. En effet, il faut que les fondations soient solides et que les murs soient suffisamment épais pour résister à la flexion. Le mortier doit également être adapté pour éviter les fissures de retrait, et, bien entendu, la qualité de construction est primordiale. Les ouvertures ne doivent pas non plus être trop nombreuses, trop proches ou à proximité d'un angle.

En ayant ces facteurs de dégradations en tête, les étudiants ont alors pu inspecter la Maison en Terre, cependant, ils n'ont pas pu accéder au toit et aux dômes par l'intérieur. Ils ont constaté quelques fissures présentes surtout autour des ouvertures et à la base des coupoles, mais elles étaient plutôt superficielles et aucune ne dépassait les 2 mm de largeur. Ils ont pu noter qu'il n'y avait pas de fissure en bas des murs qui témoignerait d'une remontée d'humidité, ni de basculement de murs. Cela laisse donc penser qu'il n'y a pas de problème particulier affectant la structure de la maison. Celle-ci a été relativement bien conçue et son radier en béton est suffisamment étanche pour protéger la maison des remontées d'eau. En revanche, un certain nombre de traces de coulure d'eau sont visibles à l'intérieur et à l'extérieur de la maison. Mais il est difficile de savoir si cela est lié au fait que la maison a vécu deux ans après sa construction sans la toile de protection, ou si cela est dû à une mauvaise conception de cette toile. On remarque notamment une réparation sur la toile, qui témoigne d'un ancien trou. Il faudrait donc surveiller attentivement les évolutions de ces traces d'eau, pour déterminer s'il s'agit de dégradations datant du début de vie de la maison, ou si la bâche de protection n'est pas suffisamment débordante pour protéger correctement les façades. Dans ce cas, il faudra étudier des solutions envisageables pour améliorer la protection, telles que le remplacement de la toile ou la pose d'enduit sur les murs.



Figure 9 : Traces d'eau sur la façade Sud de la maison. Production personnelle

En 2017, un autre groupe d'étudiants (PIAZZOLLA, QUAY-THEVENON, VOLLE, VYARAVANH-GIRARD) avait pour objectif de vérifier le comportement mécanique de la Maison en Terre en vue d'une éventuelle réhabilitation thermique. Ils ont donc modélisé la maison sur Revit puis Robot, mais la toiture avec ses voûtes et ses coupoles a posé problème, et ils ont donc dû se résigner à supprimer la toiture du modèle. Ils ont alors modélisé cette dernière sur Autocad afin de calculer une descente de charges et d'appliquer ces efforts sur les murs. Ils ont pu conclure de cette étude que la structure actuelle des parois de la maison est en mesure de supporter des charges d'isolation sans que cela n'impacte sa stabilité. Elle est donc également stable sans isolation. En revanche, leur étude se limitait à l'analyse du comportement des éléments verticaux (murs et poteaux), et ils n'ont pas pu étudier de manière précise le comportement des éléments de toiture en coupole et voûte.

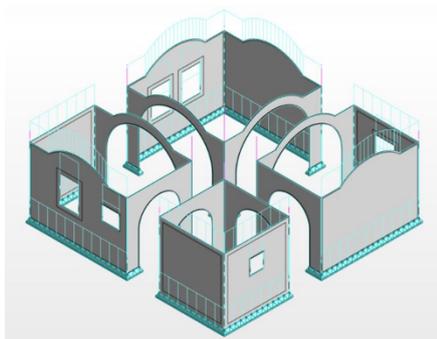


Figure 10 : Modèle numérique sous Robot (avec charges)
Source : rapport PIAZZOLLA et al.

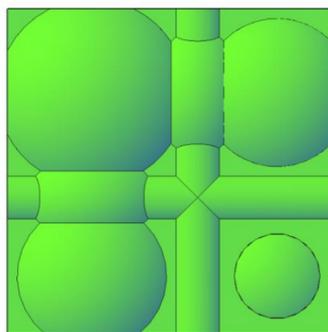
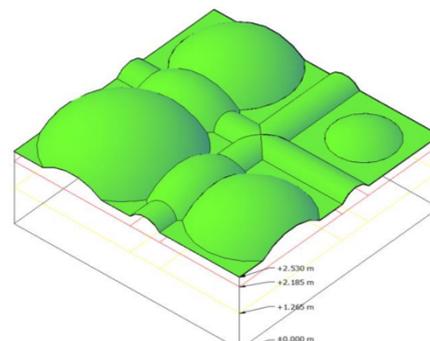


Figure 11 : Modèle surfacique de la toiture sous AutoCad.
Source : rapport PIAZZOLLA et al.



1.3 Fréquences de résonance et effets de site à Grenoble

1.3.1 L'importance de la fréquence de résonance d'une structure

Bien qu'elles constituent une technologie de construction simple et peu coûteuse, les constructions en terre sont très vulnérables aux phénomènes naturels tels que les tremblements de terre. Les structures traditionnelles subissent de graves dommages structurels, jusqu'à l'effondrement, entraînant des pertes significatives en termes de vies humaines et de dégâts matériels. Ces faiblesses sont dues au poids élevé de la structure, à sa faible résistance, et à son comportement fragile (BLONDET et al., 2003). Mais les dégâts peuvent être limités en prenant de bonnes dispositions constructives, avec une implantation sur des sols adaptés (pas trop 'mous'), mais aussi avec un entretien régulier des bâtiments.

Même en prenant les précautions nécessaires, un bâtiment, ou plus généralement une structure, peut s'effondrer brutalement si sa conception n'a pas été suffisamment réfléchi et qu'il entre en résonance. On peut notamment citer le malheureusement célèbre pont de Tacoma, qui est entré en résonance et s'est effondré en à peine plus d'une heure le 7 novembre 1940, quelques mois seulement après sa construction.

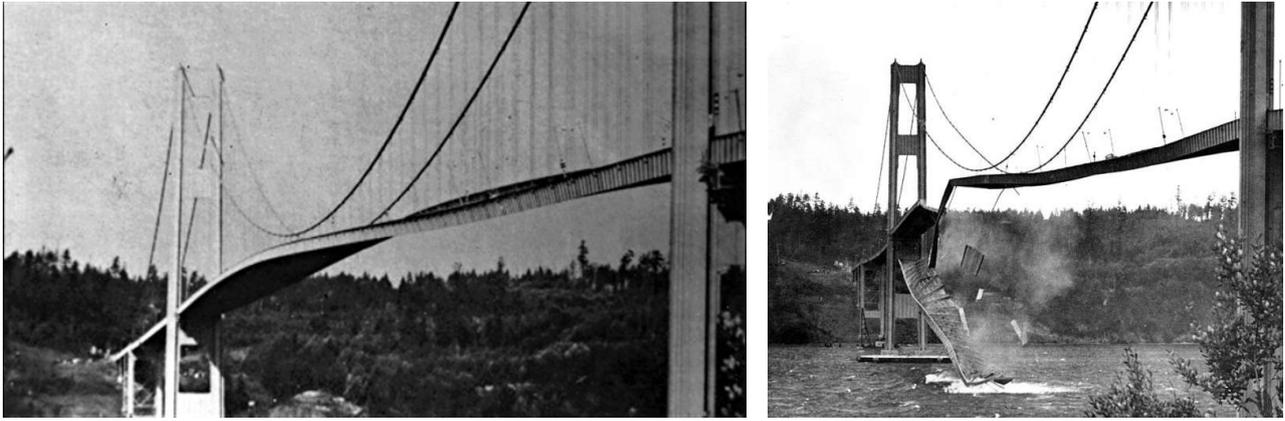


Figure 12 : Le pont de Tacoma aux États-Unis. Source : Google Images

La fréquence de résonance est donc un élément déterminant dans l'évaluation de la résistance d'une structure, et il est primordial de la prendre en compte dans la conception d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art. En effet, quand deux fréquences voisines se rencontrent, il y a une amplification considérable des mouvements, et le bâtiment peut entrer en résonance, le fragilisant sensiblement. Il faut donc éviter le plus possible que la structure ait la même fréquence propre que son environnement, à savoir principalement le sol pour une maison.

Il est possible d'estimer avec des méthodes simplifiées la fréquence de résonance d'un bâtiment ayant une structure relativement simple et régulière, en se basant sur son nombre d'étage. La formule la plus simple généralement utilisée pour la période propre est $T = N/10$ pour un bâtiment souple, et $T = N/20$ pour une structure rigide, avec N le nombre d'étage (MICHEL et al., 2007). Ce qui donnerait pour une maison à un étage une fréquence propre comprise entre 10 Hz et 20 Hz. Mais ces estimations ne prennent en aucun cas en compte les particularités du bâtiment, et sont généralement plus adaptées à des structures en béton qu'en terre crue. La meilleure solution reste donc de savoir la fréquence propre réelle d'un bâtiment en réalisant des mesures in situ. C'est donc ce que je vais essayer de déterminer par la suite avec la Maison en Terre. Mais avant de réaliser ce travail, il est intéressant de connaître la ou les fréquences de résonance du sol à Grenoble, pour pouvoir les comparer.

1.3.2 Sismicité locale

Globalement, la sismicité en France est modérée, même si des séismes destructeurs ont déjà eu lieu. Grenoble, situé au nord des Alpes en bordure externe du massif alpin, a une sismicité active intense et a également connu des séismes importants. Une cinquantaine d'événements historiques ont été localisés autour de la ville, mais à proximité immédiate, les séismes atteignent généralement des intensités inférieures à V, à l'exception de trois séismes : au Grésivaudan en 1851 avec une intensité V-VI, à Corrençon en 1962 avec une intensité VII-VIII et à Voreppe en 1754 avec une intensité VI-VII. Et une faille active située au niveau du massif de Belledonne engendre des séismes de magnitude

atteignant 3 et plus (DUNAND et GUEGUEN, 2010). Les sismologues estiment tout de même qu'un séisme de magnitude 6 est possible partout dans les Alpes (MICHEL, 2007) !



Figure 13 : Dégâts dus au séisme de Corrençon en 1962. Source : ina.fr

Cette activité sismique peut s'expliquer par le fait que la cuvette grenobloise, en forme de "Y", est remplie de sédiments récents (alluvions postglaciaires) en couches très épaisses atteignant plusieurs centaines de mètres, confinés entre les massifs durs de la Chartreuse, de Belledonne et du Vercors (BARD, 2002). On a donc un effet de site, avec des ondes se réverbérant entre le fond du remplissage, la surface et les bords. Et même si les sols sont moins mous qu'à Mexico, on a quand même un effet de "caisse de résonance". Il en résulte donc des phénomènes de résonance et d'amplification en surface à certaines fréquences, liées à l'épaisseur des sédiments (BARD, 2002).

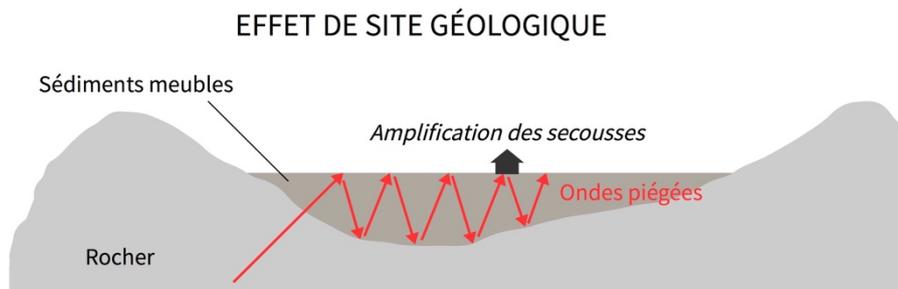


Figure 14 : Schéma illustrant l'effet de site géologique. Production personnelle

Une première campagne de mesures a été effectuée par Benoît LEBRUN en 1995, à l'aide d'un réseau de sismomètres installés dans l'agglomération. Les fréquences de résonance du bassin ont été mesurées à partir du bruit de fond sismique, c'est-à-dire des vibrations ambiantes. Les résultats ont alors montré de fortes amplifications à certaines fréquences. En effet, quel que soit l'origine du séisme, les mesures ont révélé que les vibrations dans la cuvette grenobloise sont systématiquement jusqu'à 10 fois plus intenses que sur les massifs avoisinants (BARD, 2002 et LEBRUN, 1997). Et si l'on regarde plus localement, les stations de mesure situées proche du parc Mistral, de Meylan et au niveau du LGGE vers le Campus grenoblois présentent une amplification plus importante et une durée plus longue (environ 35 secondes) que les autres stations situées à l'intérieur de la vallée (durée de 25 secondes). Pour la station du Campus, la fréquence de résonance est de $0,29 \text{ Hz}$, et il y a une amplification d'environ dix du mouvement du sol pour des fréquences de vibration comprises entre $0,25 \text{ Hz}$ et 10 Hz .

(LEBRUN et al., 2001). Malheureusement, si l'on se fie à la formule simplifiée citée précédemment, cela correspond à des fréquences propres de bâtiments allant d'une maison d'un seul étage à une tour de trente à quarante étages.

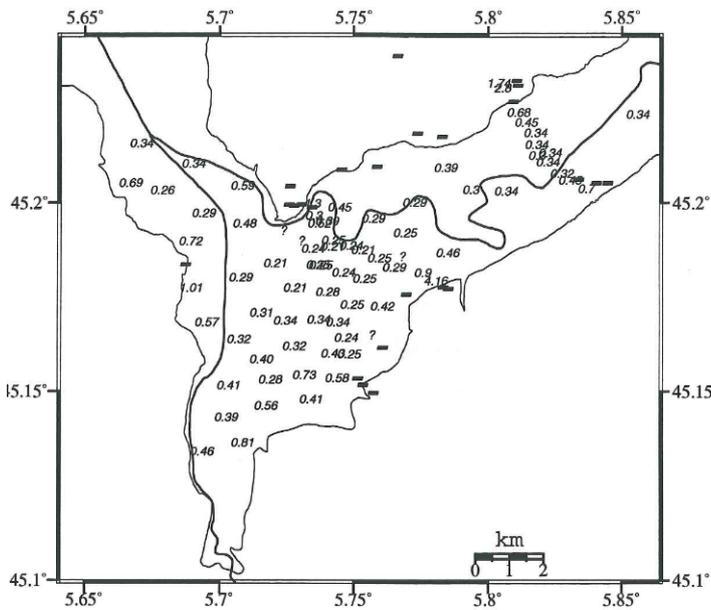


Figure 15 : Fréquences de résonance déterminées par la méthode H/V
Source : LEBRUN 1997

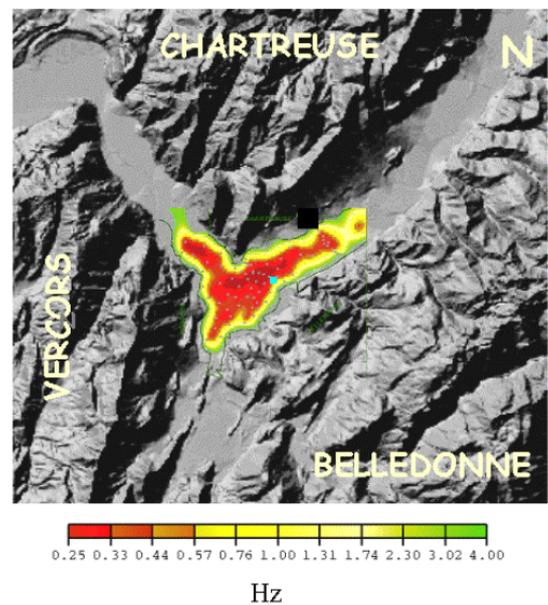


Figure 16 : Fréquences de résonance du bassin mesuré à partir du bruit de fond sismique
Source : BARD, 2002

Le Réseau Accélérométrique Permanent (RAP), membre du RESIF (Réseau sismologique et géodésique français), est un réseau de stations ayant pour objectif d'améliorer la connaissance des mouvements sismiques du sol sur le territoire français. Une base de données est accessible aux différents acteurs impliqués dans l'analyse de l'aléa et du risque sismique. Aujourd'hui, une centaine de stations sont installées en métropole et outre-mer, dont environ cinquante dans les Alpes du Nord. De plus, certains bâtiments à fort intérêt scientifique, dont l'Hôtel de Ville de Grenoble, font l'objet d'une instrumentation spécifique en vue de l'analyse de leur vulnérabilité sismique.

1.3.3 Spectre de réponse élastique et spectres de calcul

Lors d'un séisme, la majorité des dommages sur les structures est due aux vibrations du sol, qui peuvent être enregistrées à l'aide d'accéléromètres. Mais il est difficile, voire impossible, de prévoir les dégâts du prochain séisme, car il y a une grande variabilité dans les accélérogrammes d'un événement à l'autre. Il faut donc résumer ces informations, et c'est le rôle du spectre de réponse élastique en accélération (S_e). Il permet de déterminer, selon les fréquences caractéristiques des bâtiments qui sont alors assimilés à un oscillateur simple, l'accélération maximale à laquelle ils seraient soumis⁹. En

⁹ Source : *Constructions en zone sismique*, André PLUMIER, 2007

connaissant sa période et son amortissement, on peut estimer l'accélération mais aussi la vitesse et le déplacement maximaux subis par une structure. Ce spectre est fonction du type de sol et du type de séisme par le paramètre S et les périodes T_B , T_C et T_D . Il est généralement établi pour une valeur standard d'amortissement égale à 5%, mais un facteur $\eta = \max(0,55; \sqrt{10/(5 + \xi)})$ permet d'ajuster le spectre si la structure étudiée est caractérisée par une valeur d'amortissement différente. L'Eurocode 8 donne les formules suivantes pour le spectre élastique :

$$\begin{aligned}
 0 < T < T_B : S_e(T, \xi) &= (1 + (2,5 \eta - 1) T/T_B) S \\
 T_B < T < T_C : S_e(T, \xi) &= 2,5 \eta S \\
 T_C < T < T_D : S_e(T, \xi) &= 2,5 \eta S T_C/T \\
 T_D < T : S_e(T, \xi) &= 2,5 \eta S T_C T_D/T^2
 \end{aligned}$$

Pour étudier la réponse des bâtiments aux tremblements de terre, d'autres facteurs doivent être considérés. On calcule alors un spectre de calcul (S_d) pour l'analyse élastique, qui prend en compte la sismicité et la topographie de la zone d'étude, ainsi que l'importance du bâtiment :

$$S_d(T, \xi) = S_e(T, \xi) \times A_{gR} \times \gamma_I \times \tau$$

Avec : A_{gR} l'accélération maximale au rocher pour la zone sismique
 γ_I le coefficient d'importance du bâtiment
 τ le coefficient d'amplification topographique

Dans le cas de la Maison en Terre, avec un amortissement standard de 5%, on obtient les spectres élastiques suivants (un tableau des valeurs choisies est disponible en annexe C) :

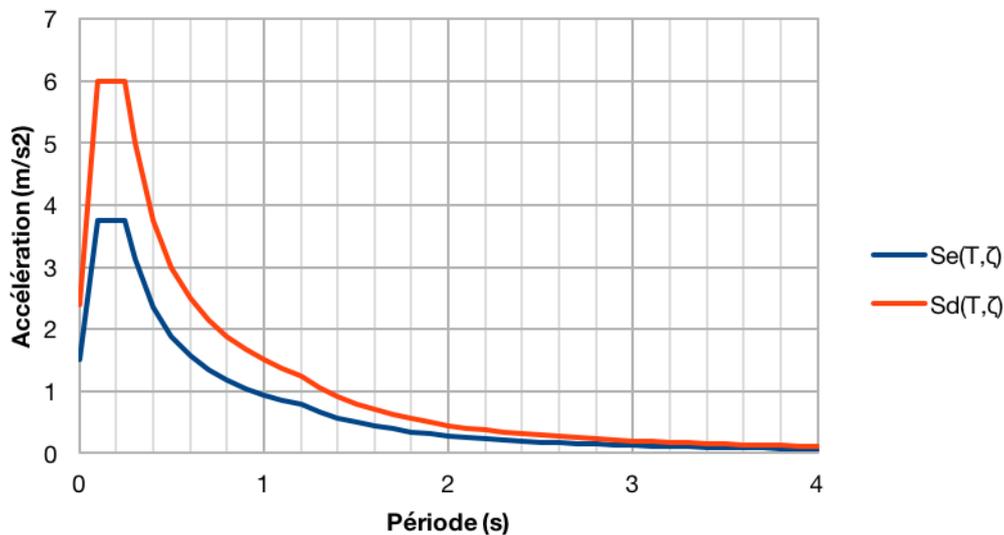


Figure 17 : Spectre élastique et spectre de calcul pour la Maison en Terre. Production personnelle

Pour une structure très raide (avec une période propre de vibration proche de 0), la pseudo-accélération maximale serait égale à S , l'accélération du sol. Cela paraît logique puisqu'une structure infiniment raide aurait tendance à suivre exactement les mouvements du sol sur lequel elle repose, sans avoir de déformée propre. En revanche, pour une structure dont la période propre serait entre T_B et T_C (au niveau du palier), il y aurait un phénomène de résonance avec une amplification des accélérations par rapport à celles au niveau du sol.

En ce qui concerne le matériau constitutif de la maison, dans l'ouvrage *Blocs de terre comprimée : équipements de production* de HOUBEN et al. (1996), il est indiqué que le coefficient d'amortissement pour des murs de 40 cm en briques de terre comprimée varie entre 5 et 10%. Les spectres de calculs sont donc différents selon ces valeurs :

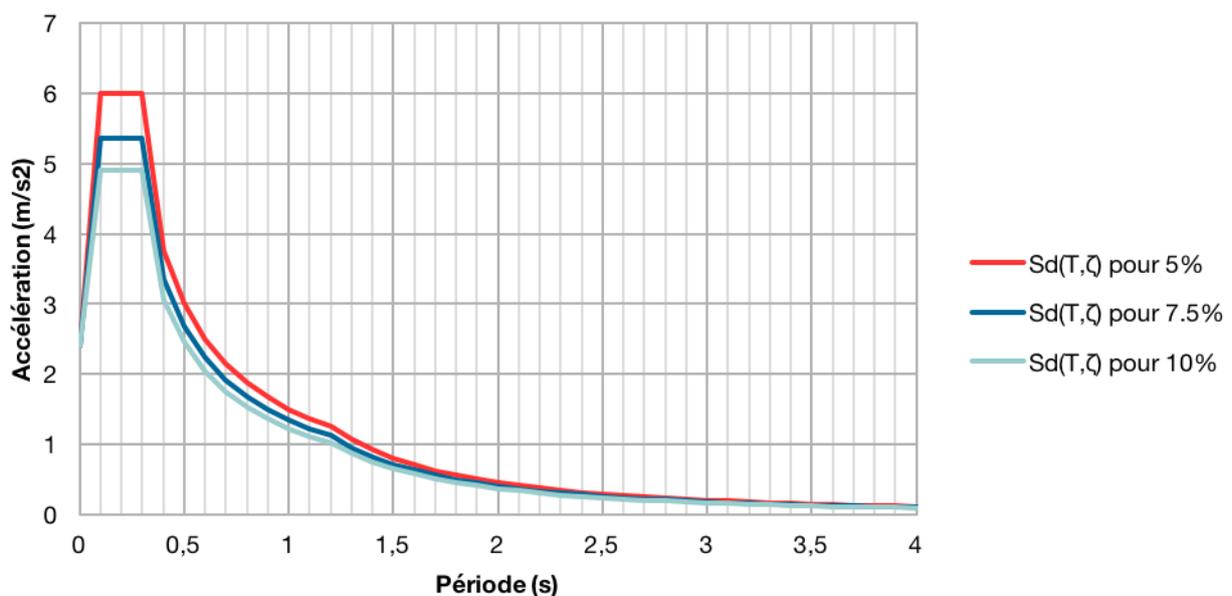


Figure 18 : Spectres de calcul avec différents amortissements pour la Maison en Terre. Production personnelle

On voit par exemple que l'accélération maximale que l'on doit prendre en compte pour le dimensionnement d'une structure ayant une période propre comprise entre 0,1 s et 0,3 s (donc une fréquence entre 3,33 Hz et 10 Hz) serait entre 4,9 m/s^2 et 6 m/s^2 . Nous verrons par la suite si c'est le cas de la maison en terre.

Cependant, ce type de spectre prend en compte les effets que peut avoir la topographie – avec le coefficient τ – mais il ne tient pas compte des éventuelles amplifications dues aux effets de site géologiques, comme c'est le cas pour la ville de Grenoble. Entre 0,25 Hz et 10 Hz, soit entre 0,1 s et 4 s, l'accélération maximale devrait donc être supérieure aux valeurs ci-dessus, mais une étude spécifique à l'échelle de la ville serait alors nécessaire pour établir un spectre réglementaire modulé qui inclut les effets de site.

2. Essais expérimentaux sur la Maison en Terre

2.1 Le bruit de fond sismique et le micro-zonage

2.1.1 Méthodes d'auscultation des bâtiments

Les mesures *in situ* permettent d'étudier le comportement réel des structures de génie civil et de caractériser leur comportement. En effet, il peut s'avérer difficile de modéliser complètement le comportement dynamique d'un bâtiment, car cela demande de connaître de nombreux paramètres parfois impossibles à mesurer directement, et certains effets peuvent être méconnus, ou complexes à modéliser. Mais il existe plusieurs méthodes d'auscultation non destructives permettant d'appréhender la dynamique d'une structure, comme par exemple des mesures sous chocs, sous excitation harmonique, sous vibration ambiante (bruit de fond sismique) ou encore sous lâchers (DUNAND, 2005). Dans sa thèse (2002), Stéphane HANS explique que chacune des méthodes est satisfaisante et que le niveau d'information accessible est en théorie le même. Mais certaines comportent tout de même des avantages, en particulier la méthode de mesures sous bruit de fond, qui ne nécessite que peu de matériel et d'effort de calcul.

SCHEMA DES METHODES D'AUSCULTATION

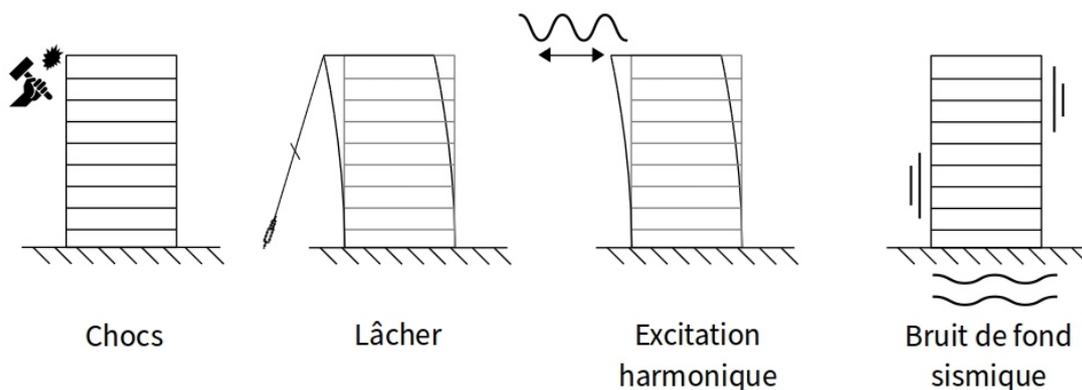


Figure 19 : Schéma des méthodes d'auscultation des bâtiments. Production personnelle

2.1.2 Le bruit de fond sismique

Le bruit de fond sismique correspond aux vibrations générées par les activités humaines et naturelles, à l'opposé des vibrations volontaires pour exciter un bâtiment. Les sources à l'origine de ces vibrations sont variées et nombreuses. Il peut s'agir de la circulation des voitures, du vent mais aussi des usines, de piétons qui marchent, de l'impact des vagues sur un rivage, etc. On distingue souvent deux types de sollicitations (BONNEFOY-CLAUDET, 2004) : celles d'origines naturelles, les microséismes, et celles d'origine anthropique, les microtrémors. On peut également identifier les sources par rapport aux

gammes de fréquences auxquelles elles émettent. Sylvette BONNEFOY-CLAUDET cite une synthèse de 1984 sur le bruit réalisée par ASTEN et HENSTRIDGE, qui distinguent les sollicitations de la manière suivante :

- En dessous de 1 Hz : sources naturelles (conditions météorologiques à grande échelle)
- Entre 1 et 5 Hz : sources naturelles (conditions météorologiques locales) ou anthropiques
- Au dessus de 5 Hz : sources anthropiques

Mais ce sont des ordres de grandeurs, puisque ces sollicitations sont fortement dépendantes de chaque site et de ses particularités. En 2009, Philippe GUEGUEN propose d'ailleurs une distribution légèrement différente, avec une identification des sources naturelles de grande ampleur en dessous de 0,5 Hz et des sources anthropiques au dessus de 1 Hz. Il identifie les sollicitations naturelles telles que le vent ou la pluie autour de 1 Hz. Il explique également que les sources anthropiques sont très variables dans l'espace et dans le temps, alors que les sources naturelles sont relativement stables. Il est donc parfois difficile de 'décrypter' le bruit de fond sismique, ce qui est arrivé lors de l'été 2006, pendant lequel « une fréquence de 5,05 Hz a été enregistrée à Grenoble, sans que son origine n'ait été expliquée » (GUEGUEN, 2005).

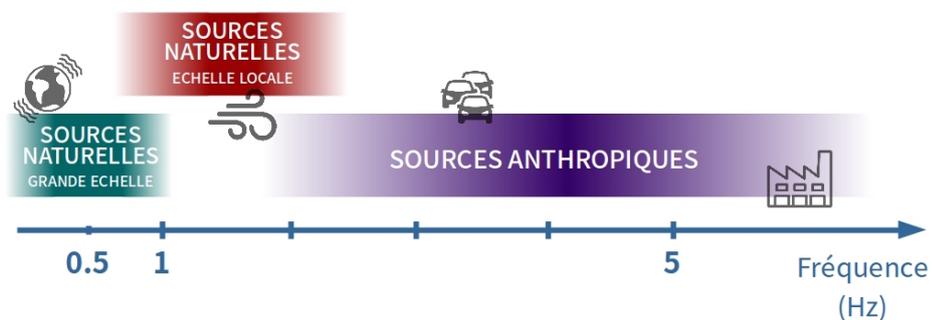


Figure 20 : Schéma récapitulatif de la répartition des sources par gamme de fréquence. Production personnelle

Le bruit de fond sismique est une sollicitation de faible amplitude, avec une accélération maximale du sol (*Peak Ground Acceleration*) de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} g (DUNAND, 2005). À titre de comparaison, l'accélération maximale en zone très sismique (Japon, Turquie) peut atteindre 0,4 à 0,6 g^{10} . Cette faible amplitude permet de ne pas endommager les structures et de ne pas perturber les éventuels utilisateurs. De plus, cette sollicitation permanente disponible partout permet d'ausculter les bâtiments avec très peu de matériel, ce qui rend cette méthode peu coûteuse et facile à appliquer en milieu urbain. Dans sa thèse (2002), Stéphane HANS estime qu'un seul capteur en tête de la structure peut donner beaucoup d'informations sur l'estimation de la vulnérabilité d'une structure. Et par rapport aux sources actives, le bruit de fond a l'avantage d'être constitué de basses fréquences, ce qui permet une meilleure profondeur de pénétration (CADET, 2007).

¹⁰ Faculté des Sciences Appliquées Département d'Architecture, Géologie, Environnement & Constructions, *Constructions en zone sismique*, André PLUMIER, 2007

Par ailleurs, une fois les mesures *in situ* réalisées, cette méthode présente une certaine facilité d'extraction des informations, puisqu'une identification quasi complète des caractéristiques dynamiques d'une structure - hormis l'amortissement que l'on peut seulement approximer - ne demande que peu d'efforts de calcul (HANS, 2002). C'est donc une méthode rapide et simple d'application, qui permet d'obtenir facilement certains paramètres du comportement dynamique d'un bâtiment, notamment ses premières fréquences modales. Et en réalisant plusieurs campagnes de mesure (avant et après un séisme par exemple), il est possible de suivre et contrôler l'évolution de paramètres modaux des bâtiments. Une exploitation de ces variations peut mettre en évidence un endommagement de la structure, ce qui permettrait d'évaluer le niveau de sûreté de cette dernière. Il pourrait donc être judicieux de mettre en place ce type de méthode d'auscultation pour les bâtiments prioritaires tels que les hôpitaux, les centrales nucléaires ou encore les services de secours.

Cependant, en 2009, Philippe GUEGUEN montre que la réponse des structures varie avec l'importance de la sollicitation. Le faible niveau d'amplitude du bruit de fond pourrait donc ne pas être suffisant pour caractériser le comportement réel d'un bâtiment sous séisme. Il est donc préférable de vérifier la pertinence des résultats en les comparant à ceux issus d'expérimentations réalisées avec d'autres méthodes, telles que celles évoquées précédemment.

2.1.3 La méthode H/V pour le micro-zonage

La méthode H/V, ou méthode de "Nakamura", est l'une des méthodes basées sur le bruit de fond les plus utilisées pour étudier et caractériser des effets de site, et pour du micro-zonage sismique. Elle consiste à « obtenir une estimation de la fréquence de résonance d'un site en effectuant le rapport des amplitudes spectrales du bruit enregistré sur les composantes horizontales et la composante verticale », à un endroit donnée (BONNEFOY-CLAUDET, 2004). Le résultat est ensuite présenté dans le domaine fréquentiel, et le but est alors d'identifier un pic de résonance, qui peut, s'il répond à certains critères (CADET, 2007), correspondre à la fréquence propre du site où a été réalisée la mesure.

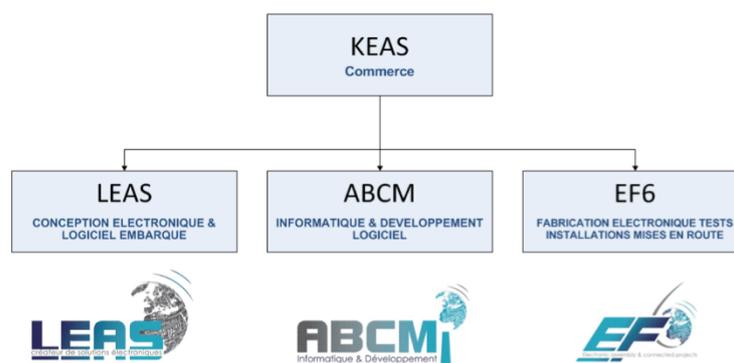
Entre 2001 et 2004, le programme de recherche européen SESAME¹¹ a travaillé dans l'objectif de mieux comprendre l'origine du pic de résonance sur les courbes H/V, et de définir les possibilités et les limites de cette méthode. Mais en 2007, Héloïse CADET estime toujours que, même si cette approche est couramment utilisée, son emploi n'est pas suffisamment standardisé, et les interprétations manquent parfois de justification. Enfin, cette méthode semble plus adaptée à l'étude des vibrations des couches de sol qu'à l'analyse des fréquences propres d'une structure ou d'un bâtiment (BONNEFOY-CLAUDET, 2004), pour lesquels il est plus judicieux de faire appel à des spectres de Fourier.

¹¹ Site EffectS using Ambient Excitations

2.2 Premiers essais dans le bâtiment 3SR

2.2.1 Présentation de la station Minishark

La station d'enregistrement de bruit de fond Minishark est arrivée au laboratoire fin mars 2018, et à mon arrivée, Dominique DAUDON, Yannick SIEFFERT et moi-même avons donc suivi une courte formation dispensée par deux ingénieurs du groupe KEAS¹², qui développe et vend ce produit en France mais également à l'international. Le groupe KEAS est né de la fusion de trois groupes (LEAS, ABCM et EF6) basés autour de Grenoble, et désireux de mettre en commun leurs efforts et leurs moyens pour apporter des solutions techniques et industrielles, dans des domaines tels que le transport et la sécurité maritime, la sécurité automatisée ou encore la sécurité sismique.



Un partenariat a été mis en place entre ce groupe et le laboratoire ISTerre¹³, qui travaille souvent en collaboration avec le laboratoire 3SR, pour développer des appareils enregistreurs spécifiques (stations sismiques) pour les études de bruit de fond. Il y a précédemment eu la station Cityshark I puis II, la station Waran et désormais il existe la station Minishark. La particularité de cette dernière est qu'elle est la seule station à l'heure actuelle à proposer une synchronisation des horloges GPS des différentes stations en temps réel.

Ces stations ont l'avantage d'être compactes et mobiles grâce à une batterie interne puissante et une carte SD amovible. Les paramètres d'enregistrement peuvent être directement configurés sur la station et le bruit interne faible lui permet d'utiliser un capteur pouvant étudier des fréquences aussi basses que $0,2 \text{ Hz}$. Le GPS interne, l'horloge de haute qualité et les capacités d'enregistrement continu lui permettent d'être utilisée également pour la surveillance des tremblements de terre¹⁴.

¹² Konsortium Ingénierie Activités & Sécurité, Saint-Ismier, France

¹³ Institut des Sciences de la Terre, Grenoble et Chambéry, France

¹⁴ Source : <https://www.toshindia.com/products/city-shark-ii-ambient-vibration-recorder>

Dans notre cas, la station Minishark est associée à un capteur produit par la société Lennartz Electronic. Il s'agit du capteur LE-3Dlite MkIII, pouvant mesurer des fréquences allant de 1 Hz à 100 Hz.



Figure 22 : Matériel de mesure. Production personnelle

C'est ensuite le laboratoire ISTerre qui développe, distribue et maintient Geopsy¹⁵, un logiciel libre qui traite et analyse les données récoltées par la station. Ces données sont stockées dans un fichier texte, avec un en-tête regroupant les différents paramètres, puis trois colonnes de nombres correspondant aux tensions mesurées pour l'axe vertical (Z), l'axe Nord-Sud, puis l'axe Est-Ouest.

L'une de mes premières tâches a été de prendre en main à la fois la station, le capteur et le logiciel d'analyse des données, et de créer une notice d'utilisation simple à destination des futurs étudiants dans le cadre du projet e-CoLoS! (annexe D).

PROBLÈME D'EXPLOITATION DES DONNÉES

À mon arrivée, le logiciel Geopsy a été installé sur mon ordinateur sous Linux, mais celui-ci refusait de lire le fichier texte des données et d'afficher les signaux. Nous avons d'abord pensé qu'il s'agissait d'une erreur de compilation lors de l'installation du logiciel, et en attendant une solution durable à ce problème, j'ai donc créé un programme Scilab me permettant une première analyse simple des résultats des essais. Il s'agit d'un programme affichant les trois signaux temporels sur un même graphe, puis affichant l'analyse de Fourier discrète des trois signaux correspondant aux trois axes de mesure.

Après avoir essayé à nouveau d'exploiter les fichiers avec le Logiciel Geopsy, j'ai finalement réussi à ouvrir un fichier exemple disponible dans une section de l'onglet « Documentation » du site Geopsy.org. Je me suis alors rendu compte que le problème avec les fichiers que j'avais obtenus venait de l'entête. En effet, le logiciel Geopsy sur Ubuntu est adapté aux fichiers provenant de la station Cityshark, qui ont un en-tête différente de celle des fichiers extraits de la Minishark.

¹⁵ Ce logiciel est né en 2005 au cours du projet européen SESAME, dont l'objectif était l'estimation des effets de site pour l'atténuation des risques sismiques, en particulier en zone urbaine

Nous avons communiqué cette incompatibilité à l'équipe ISTerre qui développe Geopsy, mais en attendant, j'ai donc créé un autre programme Scilab qui, à partir d'un fichier texte sous le format Minishark, créé une copie avec un en-tête sous le format Cityshark, lui permettant d'être lisible par le logiciel Geopsy.

J'ai donc pu exploiter mes résultats avec le programme Scilab (FFT) et avec le logiciel Geopsy (nous avons finalement remarqué que Geopsy fonctionnait avec les fichiers Minishark sur Mac et sur PC). Les courbes obtenus étant nombreuses et parfois complexes à analyser, j'ai ensuite rencontré Philippe GUEGUEN, chercheur à ISTerre, pour discuter de mon interprétation des résultats par les différents outils.

2.2.2 Essais dans le bâtiment 3SR

Afin de prendre en main et de comprendre le fonctionnement de la station, j'ai d'abord réalisé quelques mesures dans mon bureau du laboratoire 3SR. J'ai effectué une série de mesures avec une durée d'acquisition relativement courte de cinq minutes (il est préconisé¹⁶ de faire des mesures de vingt minutes pour l'étude précise d'un bâtiment), et avec différentes configurations :

- Capteur seul posé sur le sol au centre de la pièce
- Capteur posé sur une brique (BTC) posée à plat sur le sol et orientée longitudinalement vers le Nord
- Capteur posé sur une brique (BTC) posée à plat sur le sol et orientée longitudinalement vers l'Ouest
- Capteur posé sur deux briques (BTC) posées à plat sur le sol et orientée longitudinalement vers le Nord
- Capteur posé sur trois briques (BTC) posées à plat sur le sol et orientée longitudinalement vers le Nord

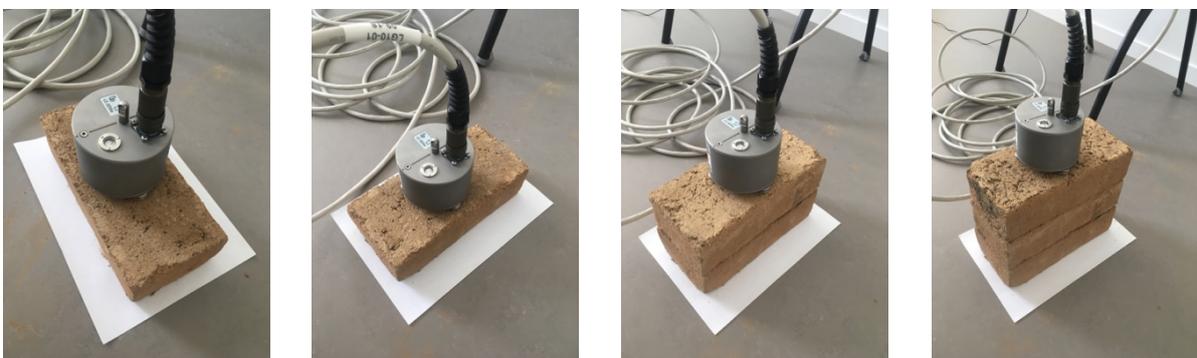


Figure 23 : Quatre essais avec la brique en terre comprimée. Production personnelle

¹⁶ Mail de Florian RIONDET, élève ingénieur de chez Keas, préconisation des collaborateurs ISTerre

Après exploitation des résultats avec le programme Scilab, on obtient des graphes de FFT très similaires, avec globalement les mêmes pics de résonance :

- De nombreux pics entre 3 et 4 Hz, dont deux pics importants à 3,48 Hz et 3,85 Hz
- Des pics à 13,6 Hz, 24,5 Hz et 80 Hz

On remarque sur les spectres de Fourier (présents en annexe E) qu'il y a très peu de différences avec ou sans la brique. De plus, malgré le changement d'orientation de celle-ci sous le capteur, il n'y a pas d'inversion des graphes E-O et N-S, alors que lorsque l'on pivote de 90° le capteur, il y a bien une inversion de ces graphes (avec le graphe selon Z identique).

La brique semble être donc être « transparente » pour le capteur. En effet, on peut choisir au maximum une fréquence d'échantillonnage $f_{e,max} = 400 \text{ Hz}$, or le théorème de Shannon dit que la fréquence d'échantillonnage doit être au moins égale au double de la fréquence maximale f_{max} du signal analogique. Donc on peut au maximum mesurer des fréquences allant jusqu'à 100 Hz, ce qui est très probablement trop faible détecter la fréquence de résonance de la brique. Il est tout de même intéressant de vérifier cela avec une modélisation en éléments finis à l'aide Code_Aster. De plus, le poids du capteur étant dans le même ordre de grandeur que celui de la brique, il n'est pas sûr que cette mesure soit pertinente.

Pour pouvoir calculer les modes propres d'une brique en terre comprimée¹⁷ avec Code_Aster, il faut d'abord créer sa géométrie et son maillage avec Salome Meca. C'est une structure simple que l'on modélise uniquement en extrudant une face rectangulaire, et que l'on maille ensuite de manière régulière :

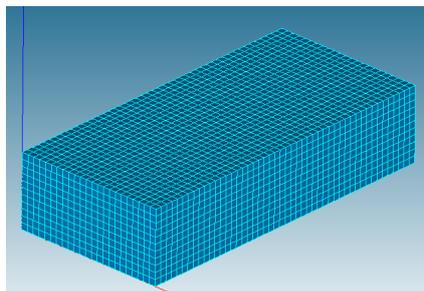


Figure 24 : Maillage de la brique avec Salome Meca.
Production personnelle

Il faut ensuite créer le fichier de commande dans le module AsterStudy de Salome Meca pour calculer les modes. Il faut pour cela définir le type de modélisation, le matériau, les conditions aux limites, etc. J'ai choisi des paramètres extraits de la littérature (BRUNO et al., 2015, HOUBEN et al., 1996) pour caractériser la brique en terre comprimée : $E = 2000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.2$ et $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$.

¹⁷ Avec les dimensions d'une brique « classique » : 24cm x 11.5cm x 5.5cm

```

DEBUT()

mesh = LIRE_MALLAGE(FORMAT='MED', UNITE=2) //Lecture du maillage

model = AFFE_MODELE( //Choix de la modélisation du phénomène physique
  AFFE= F(MODELISATION=('3D', ), PHENOMENE='MECANIQUE', TOUT='OUI'),
  MALLAGE=mesh
)

elemprop = AFFE_CARA_ELEM( //Affectation des caractéristiques géom. et mat. aux éléments de structure
  MASSIF=_F(ANGL_REP=(0.0, ), GROUP_MA=('solid', )), MODELE=model
)

BTC = DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=2000000000.0, NU=0.2, RHO=2100.0)) //Création du matériau BTC

fieldmat = AFFE_MATERIAU( //Affectation du matériau au maillage
  AFFE=_F(MATER=(BTC, ), TOUT='OUI'), MALLAGE=mesh, MODELE=model
)

load = AFFE_CHAR_MECA( //Définition des conditions aux limites
  DDL_IMP0=_F(GROUP_MA=('botface', ), LIAISON='ENCASTRE'), MODELE=model
)

ASSEMBLAGE( //Assemblage, calcul des matrices des masses et de rigidité
  CARA_ELEM=elemprop,
  CHAM_MATER=fieldmat,
  CHARGE=(load, ),
  MATR_ASSE=(
    _F(MATRICE=CO('mass'), OPTION='MASS_MECA'),
    _F(MATRICE=CO('rigi'), OPTION='RIGI_MECA')
  ),
  MODELE=model,
  NUME_DDL=CO('nddl')
)

unnamed0 = CALC_MODES( //Calcul des modes propres de la structure
  CALC_FREQ=_F(NMAX_FREQ=20), //Nombre de fréquences calculées
  MATR_MASS=mass,
  MATR_RIGI=rigi,
  OPTION='PLUS_PETITE' //On récupère les 20 fréquences les plus basses
)

IMPR_RESU(FORMAT='MED', RESU=_F(RESULTAT=unnamed0), UNITE=80) //Impression des résultats

FIN()

```

Figure 25 : Fichier de commande Code_Aster pour l'analyse modale de la brique. Production personnelle

On récupère ensuite les différents résultats : les fréquences propres calculées sont données dans la console de Salome Meca, et on peut visualiser les déplacements de la brique pour chaque mode dans le module ParaVis. Pour cette brique, les vingt premières fréquences de vibrations sont comprises entre 2415,90 Hz et 5057,76 Hz. Ces fréquences sont effectivement trop élevées pour pouvoir être détectée par le capteur et la station Minishark. Les allures des déformées pour les premiers modes propres sont présentées ci-dessous :

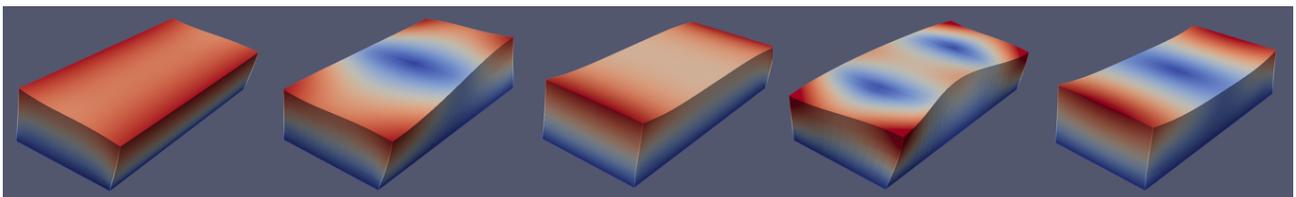


Figure 26 : Allure des déformées pour les 5 premiers modes propres. Production personnelle

J'ai ensuite réalisé d'autres mesures dans le bâtiment Galilée du laboratoire 3SR, dans mon bureau mais également à une autre localisation sur différents étages. L'exploitation des transformées de Fourier obtenues n'est pas facile lorsqu'on observe qu'une seule courbe à la fois. En effet, il est difficile de choisir quels pics sont pertinents. J'ai donc d'abord essayé de relever les pics les plus importants et de comparer les valeurs numériques entre différents essais. Certains pics étaient très nets alors que d'autres étaient plus flous. Certaines fréquences étaient tout de même récurrentes dans les différents essais : un groupe de pics entre 3 et 4 Hz, et des pics à 13,6 Hz, 24,5 Hz et 80,0 Hz par exemple.

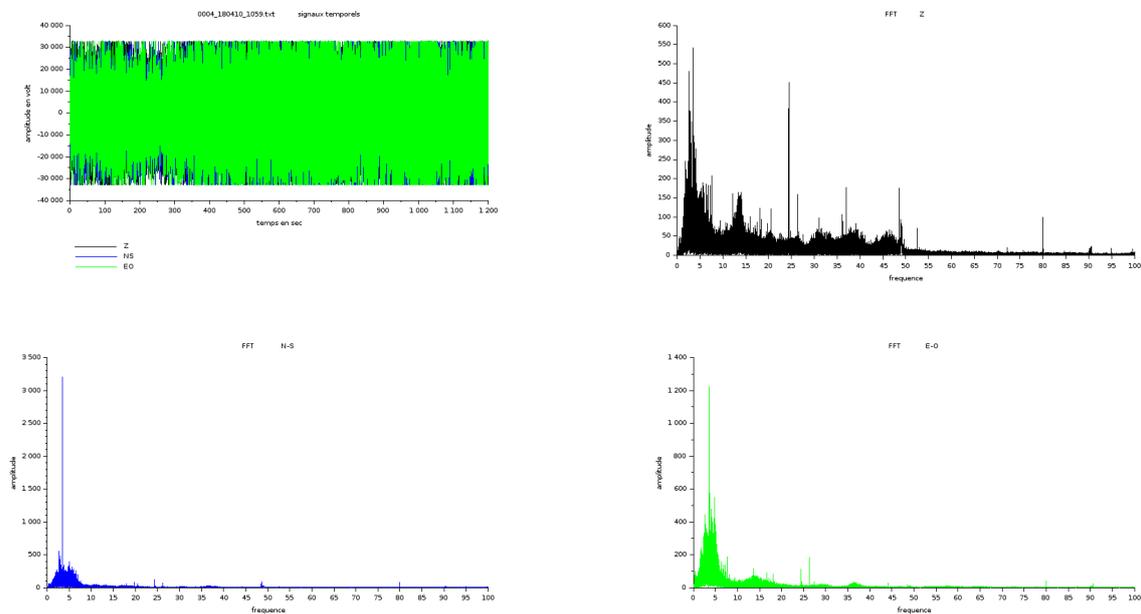


Figure 27 : Signal et transformées de Fourier d'un essai réalisé dans le bâtiment 3SR. Production personnelle

J'ai donc vite remarqué que les courbes avaient globalement le même profil, et qu'il était intéressant de les étudier groupées. J'ai donc tracé à l'aide de Geopsy le spectre de Fourier de quatre essais de vingt minutes, tous dans le bâtiment mais à différents endroits et étages.

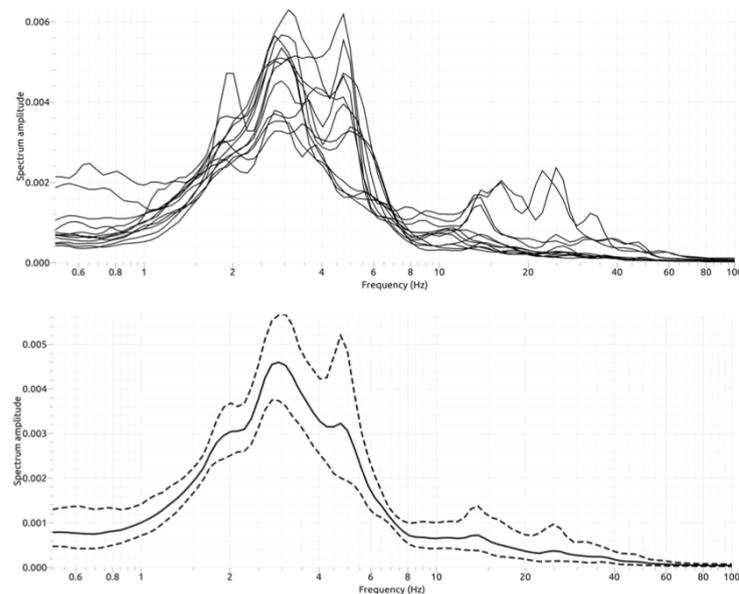


Figure 28 : Spectres de Fourier des quatre essais dans le bâtiment 3SR. Sur les courbes du bas apparaissent le spectre moyenné et les écarts-types. Production personnelle

On retrouve bien l'ensemble de pics autour de 3 – 4 Hz, avec notamment trois pics importants à environ 2 Hz, 3 Hz et 4.8 Hz, ainsi que les pics à environ 13,6 Hz, et 24,5 Hz. On voit également un léger pic autour 34 Hz, or j'avais repéré dans les courbes Scilab quelques pics de fréquences à 35 Hz, 36,2 Hz et 37 Hz sur certains essais. En revanche, que ce soit en échelle logarithmique ou en échelle linéaire, le pic à 80 Hz repéré précédemment sur les courbes Scilab n'apparaît pas, ce qui est probablement dû à un lissage des courbes sur Geopsy.

Par la suite, je suis allée réaliser des mesures à l'extérieur, à une dizaine de mètres maximum autour du bâtiment Galilée. J'ai retrouvé un spectre de Fourier avec une allure similaire, mais avec des pics diminués en amplitude. Cela met en évidence les travaux de Philippe GUEGUEN, qui analyse les interactions entre le sol et la structure, et qui montre donc que si l'on mesure les vibrations au sol près d'un bâtiment, on détecte les fréquences propres de celui-ci. Sous ses conseils, j'ai également tracé les courbes H/V de ces mesures, afin de retrouver la fréquence de résonance du site qui est autour de 0,29 Hz. Sur Geopsy, pour calculer la courbe H/V, le signal est découpé en fenêtres temporelles de quelques secondes, et seules les fenêtres dans lequel le signal est relativement stable (pas de perturbation locale) sont conservées. Les différentes courbes obtenues sur ces fenêtres sont ensuite moyennées, et le résultat pour l'extérieur du bâtiment 3SR est le suivant :

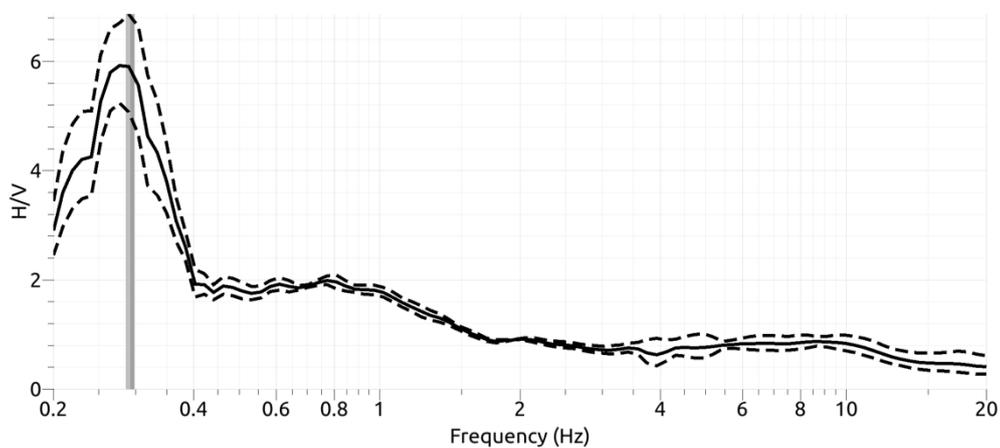


Figure 29 : Courbe H/V de l'ensemble des mesures réalisées à l'extérieur du bâtiment 3SR. Production personnelle

Sur ce spectre, la fréquence de résonance se situe entre les deux aires grises, qui correspondent à son écart-type. On retrouve donc bien la fréquence de résonance à 0,29 Hz déterminée par LEBRUN un niveau du campus de Grenoble.

2.3 Mesures sur la Maison en Terre

2.3.1 Estimation manuelle de la fréquence propre

Avant de réaliser des mesures par bruit de fond sur la maison, il peut être intéressant d'avoir une idée des fréquences propres que l'on pourrait obtenir. Pour cela, il est possible de faire une première approximation de la période en simplifiant la structure. C'est ce qu'a fait un groupe d'étudiants (DESCHAMPS, HEQUET, GARDINER et BAUDY) de l'IUT GCCD, en calculant d'abord la raideur horizontale de la maison puis sa masse, pour ensuite calculer la période. Ces opérations sont décrites succinctement ci-dessous.

Pour commencer, ils simplifient la géométrie de la maison (sans toiture) de la manière suivante :

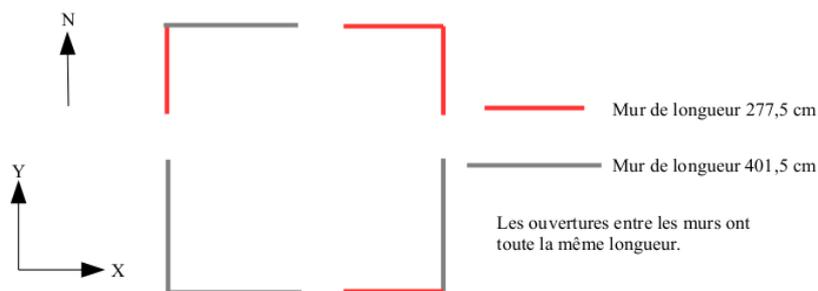


Figure 30 : Simplification de la géométrie de la maison. Source : rapport DESCHAMPS et al.

On remarque que les ouvertures des fenêtres, les poteaux centraux ainsi que le retour des murs sont négligés. En revanche, au vu de la symétrie de la maison, la raideur sera la même selon les axes X et Y, et il suffira de sommer les raideurs des murs seuls (deux murs de 2,775 m et deux murs de 4,015 m). Ils calculent alors la raideur d'un mur à l'aide de la formule suivante :

$$k_{z, fissuré} = 0,5 \left[\frac{L^3}{nEI_2} + \frac{L}{GS} \right]^{-1} \text{ avec } S = bh; I_2 = bh^3/12$$

Figure 31 : Formule de la rigidité d'un mur. Source : rapport DESCHAMPS et al.

Cette formule semble correcte, mais aucune source n'est citée, et aucun calcul intermédiaire n'apparaît. Mais en effectuant quelques recherches, j'ai pu trouver une formule similaire (avec cependant un facteur $\frac{1}{2}$ en moins) pour le calcul de la rigidité d'un mur en maçonnerie dans un ouvrage de Marcel HUREZ et al. intitulé « Dimensionner les ouvrages en maçonnerie. Guide d'application » :

2.5.2.1 Détermination de la rigidité des murs

R_{xi} et R_{yi} représentent les rigidités de flexion-cisaillement définies pour chaque direction de calcul (voir fig. 21). Elles sont définies comme suit :

$$R_{xi} = \left(\frac{h^3}{3.E.I_{yi}} + \frac{h}{G.A_{ti}} \right)^{-1} ; R_{yi} = \left(\frac{h^3}{3.E.I_{xi}} + \frac{h}{G.A_{ti}} \right)^{-1} \quad (4.41)$$

avec :

h : hauteur libre des murs,

E : module d'élasticité (module de Young) de la maçonnerie,

G : module de cisaillement de la maçonnerie, $G = 0,4 E$,

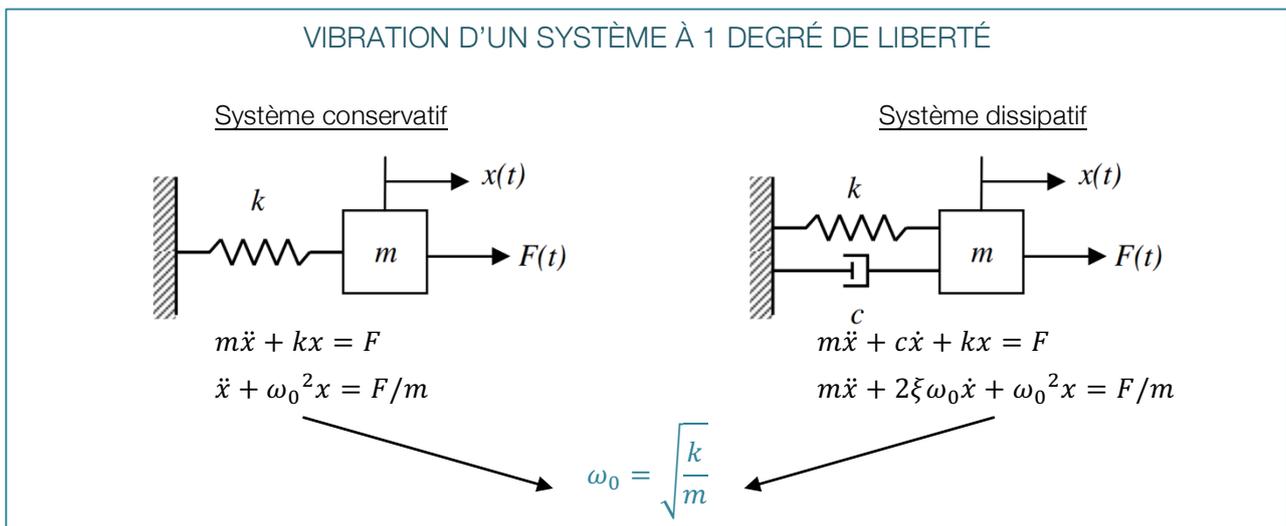
I_{yi} : moment d'inertie de la section transversale d'un mur agissant selon x ,

Figure 32 : Détermination de la rigidité d'un mur en maçonnerie. Source :
Dimensionner les ouvrages en maçonnerie de Marcel HUREZ

Pour appliquer cette formule, ils ont choisi pour les briques de terre comprimée un module de Young $E = 3000 \text{ MPa}$ et un module de cisaillement $G = 1500 \text{ MPa}$ (donc un coefficient de poisson quasi nul). À nouveau, même si les ordres de grandeurs semblent acceptables, aucune source n'est citée pour justifier ce choix.

Ils obtiennent alors une rigidité de $124,5 \text{ MN/m}$ pour les murs de $4,015 \text{ m}$ de long, et $53,64 \text{ MN/m}$ pour ceux de $2,775 \text{ m}$. Ce qui donne une rigidité totale de $k_{tot} = 356,3 \text{ MN/m}$.

Ils calculent ensuite la masse de la maison, en approximant le volume du toit, et ils obtiennent un total de $41,99$ tonnes. Ils vérifient l'ordre de grandeur de ce résultat en considérant que la maison est un simple cube avec une épaisseur de 15 cm , en majorant le volume du toit par un facteur $1,3$ et en soustrayant les portes au volume des murs. Ils obtiennent alors $43,15$ tonnes. Néanmoins, il m'a semblé voir une erreur de hauteur de mur dans ce deuxième calcul. Ils retiennent pour la suite des calculs une masse de 44 tonnes.



Enfin, ils calculent la période propre de la maison à l'aide de la formule $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_{tot}}}$ (voir encadré ci-dessus) et ils trouvent $T = 0,070 \text{ s}$, ce qui donne une fréquence propre de $14,3 \text{ Hz}$. Cette valeur paraît plausible puisqu'elle correspond à une structure d'un seul étage plutôt rigide.

Cependant, afin de pouvoir comparer par la suite cette valeur avec les résultats numériques qui suivront, j'ai décidé d'appliquer leur méthode avec les hypothèses que j'utilise dans ma modélisation de la maison. En ajoutant les poteaux centraux et le retour des murs, et en utilisant un module de Young $E = 2000 \text{ MPa}$ et $G = 833 \text{ MPa}$ (donc un coefficient de poisson égal à $0,2$), j'obtiens une rigidité totale de $224,5 \text{ MN/m}$. Pour obtenir la masse de la maison, je récupère le volume calculé par Salome Meca à partir de la modélisation éléments finis que j'ai réalisé, que je multiplie par une masse volumique de 2100 kg/m^3 . J'obtiens alors une masse totale de $70,4$ tonnes, ce qui est nettement supérieur à leurs valeurs. Cela me permet de trouver une période et une fréquence propre de respectivement $0,111 \text{ s}$ et $8,99 \text{ Hz}$. Même si l'on obtient un écart d'environ 5 Hz par rapport à leur calcul, cela reste dans un ordre de grandeur tout à fait acceptable si l'on se réfère à la formule simplifiée $N/10$ citée plus haut.

Par ailleurs, Philippe GUEGUEN explique dans ses travaux de 2009 qu'il existe une autre formule simple pour l'estimation de la période, établie par HOUSNER sur la base des données récoltées par CARDER, et aujourd'hui utilisée dans le code américain (Uniform Building Code) et le l'Eurocode 8. La période est alors exprimée par la relation :

$$T = C_t H^b$$

L'Eurocode 8 recommande d'utiliser $b = 0,75$, avec une limitation aux bâtiments de plus de 40 m , et $C_t = 0,085$ pour des portiques en acier, $C_t = 0,075$ pour des structures en béton, et $C_t = 0,05$ pour toutes les autres structures, ce qui est le cas de la Maison en Terre. Pour une hauteur d'environ 3 m , on obtient une période propre de la maison de $0,1140 \text{ s}$, soit une fréquence propre de $8,77 \text{ Hz}$, qui est toujours du même ordre de grandeur.

On peut donc s'attendre à trouver une fréquence propre (dans les deux directions X et Y) pour la Maison en Terre comprise entre 8 et 20 Hz .

2.3.2 Mesures réalisées sur la maison

Après avoir pris en main le matériel, j'ai réalisé une série de mesures sur la Maison en Terre. Quelques précautions sont à prendre quant au positionnement du capteur. Celui-ci doit être posé à plat (donc pas n'importe où sur les dômes du toit de la maison), et toujours orienté dans la même direction. Une flèche dessinée sur le capteur (qui doit être pointée vers le Nord, ou vers une direction principale du bâtiment) ainsi qu'un niveau permettent d'installer correctement le capteur.

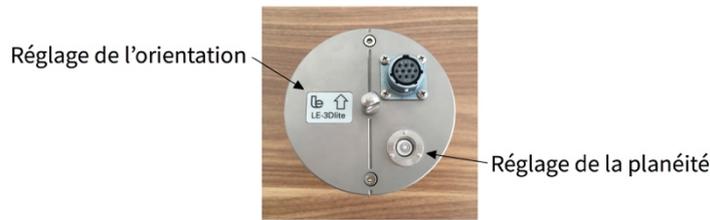


Figure 33 : Capteur utilisé pour les mesures. Production personnelle

Puis, le capteur doit être branché à l'aide d'un câble sur la station Minishark, sur laquelle quelques paramètres doivent être modifiés. J'ai choisi la fréquence d'échantillonnage maximale de 200 Hz , ce qui permet de mesurer des fréquences allant jusqu'à 100 Hz . Et en suivant les préconisations des collaborateurs à ISTERre, la durée des mesures a été fixée à vingt minutes. En effet, pour qu'un spectre soit représentatif du phénomène observé, la durée des enregistrements doit être au moins d'environ dix fois sa période (DUNAN, 2005). Avec vingt minutes d'acquisition, on peut donc étudier des fréquences de quelques dixièmes de Hertz. Et même si le capteur ne peut en théorie pas mesurer correctement des fréquences en dessous de 1 Hz , cela nous permet de prendre certaines précautions, notamment si un élément vient momentanément perturber les mesures. Il est également possible de modifier le taux de dépassement maximal autorisé (en pourcentage), que j'ai choisi de laisser à la valeur par défaut de 10%. Enfin, une fois le réglage des paramètres effectué (beaucoup d'entre eux n'ont pas besoin d'être changés, comme le facteur de conversion du capteur, la date, etc.), il faut choisir le gain adéquat à l'aide du barregraphe, puis la mesure peut être lancée.

En théorie, pour des bâtiments élancés ayant des modes bien séparés, la fréquence propre peut être calculée à l'aide d'un seul enregistrement au sommet de la structure (GUEGUEN, 2009). Mais en pratique, et d'autant plus si la maison a peu d'étages, les vibrations ambiantes sont enregistrées sur plusieurs localisations, et les spectres sont ensuite moyennés sur plusieurs fenêtres temporelles. Les mesures ont donc été réalisées lors d'une journée peu ventée, à sept endroits différents sur le toit de la Maison en Terre :

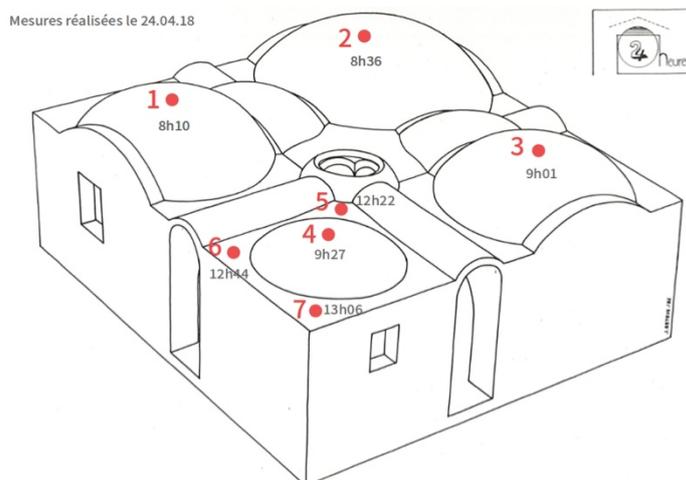


Figure 34 : Mesures réalisées sur la Maison en Terre. Production personnelle

Une fois les acquisitions terminées, les résultats sont récupérés sur la carte SD sous la forme d'un fichier texte, que l'on exploite à l'aide du logiciel Geopsy. Les trois spectres de Fourier selon les trois axes sont alors calculés sur la durée de l'enregistrement. Si on sélectionne plusieurs signaux pour une même analyse, le logiciel calcule alors un spectre moyenné et affiche les écarts-types.

Les spectres de Fourier obtenus pour chacune des mesures, et selon chaque axe (Nord-Sud, Est-Ouest, Z) sont présentés en annexe F. Le spectre moyenné résultant des mesures est le suivant :

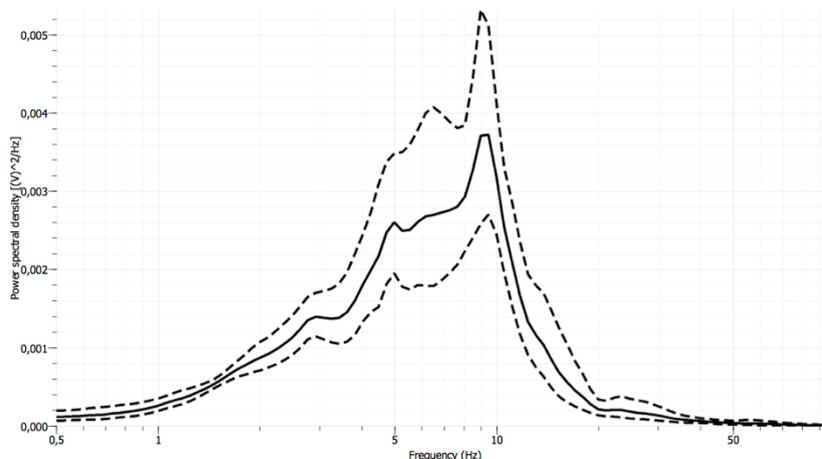


Figure 35 : Spectre moyen des mesures réalisées sur la Maison en Terre. Production personnelle

La détermination des fréquences propres se fait directement à partir des spectres de Fourier obtenus, en repérant les différents maxima. Sur le spectre moyenné, on remarque un pic de fréquence qui se distingue autour de 9 Hz, qui apparaît également sur la majorité des mesures. Il s'agit probablement de la fréquence de résonance de la maison dans les direction Nord-Sud et Est-Ouest. Il sera intéressant de vérifier cela à l'aide du modèle numérique. On voit également d'autres pics de plus faible amplitude entre 3 Hz et 8 Hz environ, mais nous ne pouvons pas directement interpréter leur source.

En revanche, si je trace le spectre H/V d'un signal au niveau du sol, cela peut me permettre d'« éliminer » certains pics de fréquence. J'ai donc réalisé une acquisition au niveau du parking à quelques mètres de la maison :

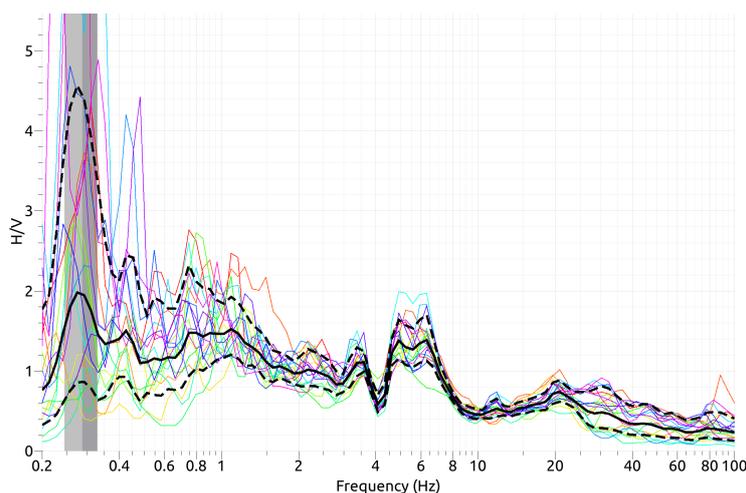


Figure 36 : Spectre H/V de la mesure au sol près de la maison. Production personnelle

Sur ce spectre, on aperçoit à nouveau la fréquence de résonance du site à environ $0,3 \text{ Hz}$, mais on remarque également deux autres pics à $6,3 \text{ Hz}$ et $4,9 \text{ Hz}$. Ce sont deux pics que l'on retrouve sur les spectres des mesures sur la maison, et on peut donc penser qu'ils ne correspondent pas à sa vibration propre. En revanche, il reste au moins un pic à environ $2,9 \text{ Hz}$ (et probablement d'autres plus « flous ») dont on ne peut pas identifier la source facilement.

Par ailleurs, les courbes obtenues ne permettent pas d'estimer l'amortissement de la structure car elles sont trop imprécises pour appliquer la méthode de la bande passante à -3 dB . Selon Stéphane HANS, il faudrait une meilleure qualité et un plus grand nombre d'enregistrements. L'incertitude sur les fréquences identifiées ne peut pas non plus être calculée car ce sont les amplitudes qui sont moyennées, et non pas les fréquences, ce qui fait que l'on ne peut pas estimer d'erreur sur celles-ci (DUNAND, 2005).

2.4 Autres expérimentations

2.4.1 Mesures sur la table vibrante du laboratoire 3SR

Le laboratoire 3SR a inauguré le 20 novembre 2017 sa nouvelle table vibrante uniaxiale de grandes dimensions. Avec un tablier et 2,5 mètres sur 3,5, elle est capable de déplacer une masse embarquée de quatre tonnes, avec des accélérations pouvant aller jusqu'à $2,2 \text{ g}$ et des déplacements jusqu'à 25 cm ($\pm 12,5 \text{ cm}$). Cette table permet de reproduire des secousses comparables à celles provoquées par la plupart des séismes en termes d'accélération, de vitesse, de déplacement et de fréquences. L'avantage d'une telle table vibrante est qu'il est possible de réaliser des essais représentatifs du comportement réel de la structure, dont les lois de comportement du matériau dépendent du temps¹⁸.



Figure 37 : Table vibrante au laboratoire 3SR.

Source : www.univ-grenoble-alpes.fr



Figure 38 : Mesure sur la table vibrante.

Production personnelle

La table vibrante de 3SR est installée sur la dalle d'essai de la plate-forme expérimentale Dessis¹⁹, elle-même constituée d'une dalle de béton d'un mètre d'épaisseur ferrillée dans trois directions pour

¹⁸ Source : Association Française du génie Parasismique, Cahier Technique n°34, Novembre 2014, *Moyens expérimentaux pour les essais sismiques : recensement, comparaison, besoins*.

¹⁹ Durabilité Et Sureté des Structures en Interaction avec le Sol

assurer sa stabilité²⁰. En collaboration avec l'école nationale d'architecture de Grenoble (ENSAG), Yannick SIEFFERT - maître de conférences à l'UGA, chercheur au laboratoire 3SR et membre du projet e-CoLoS ! - l'utilisera pour contribuer à la reconstruction au Népal, touché par deux séismes ravageurs en 2015, sur le modèle de ce qui a été réalisé pour Haïti ces dernières années.

Durant les premiers essais au laboratoire, les techniciens ont testé la table à plusieurs fréquences, et lorsque l'on était autour d'environ 5 Hz, les chercheurs également présents dans les locaux ont indiqué qu'ils avaient l'impression que la table faisait vibrer tout le bâtiment. Par ailleurs, lors de sa conception, la fréquence propre de vibration du plateau de la table a été déterminée grâce à une modélisation numérique. Cette fréquence se trouvait autour de 80 Hz. J'ai donc réalisé des mesures sur la table vibrante (aux quatre coins et au milieu) et sur la dalle sur laquelle elle est posée, afin de voir si je retrouve ces valeurs indicatives. Les spectres de Fourier obtenus sont les suivants :

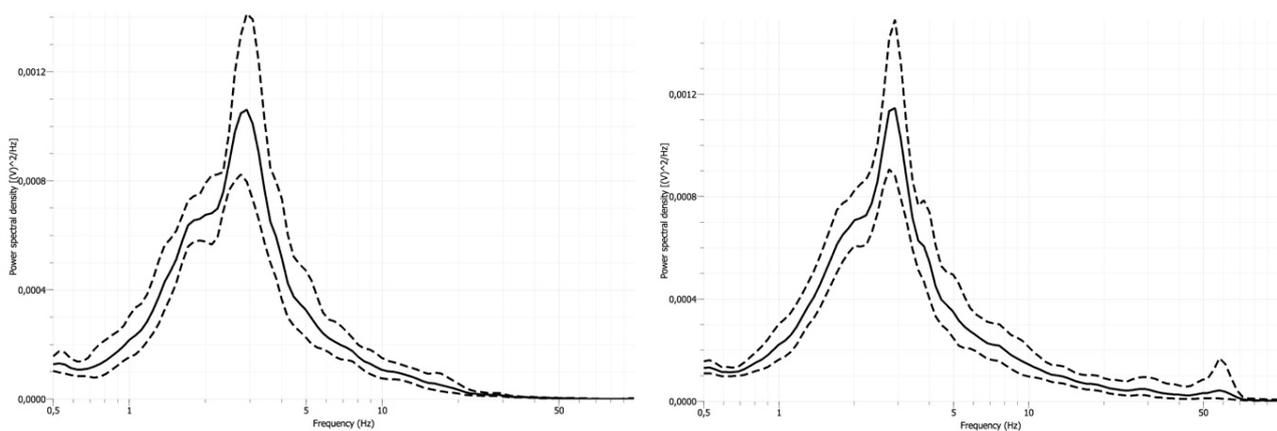


Figure 39 : Spectres de Fourier des essais sur la dalle (à gauche) et sur la table vibrante (à droite). Production personnelle

On remarque qu'il y a un pic de résonance autour de 3 Hz sur les deux spectres, et un plus petit à environ 60 Hz sur celui de la table vibrante. Le pic à basse fréquence correspond très probablement à la vibration de la dalle en béton, qui, malgré le fait qu'elle soit sciée, n'est pas totalement isolée du reste du bâtiment. C'est pour cette raison que lorsque l'on règle la fréquence de la table vibrante autour de cette valeur, le local entier semble bouger. Le pic à 60 Hz correspond quant à lui sûrement à la fréquence propre de l'ensemble de la table vibrante, dont la fréquence propre du plateau seul avait été estimée à 80 Hz.

²⁰ Source : <http://www.grenoble-inp.fr/>, article « Une table vibrante pour reconstruire dans les pays en développement »

Et à nouveau, si l'on trace la courbe H/V du signal mesuré sur la dalle en béton, on retrouve le pic de résonance du site à environ 0,29 Hz.

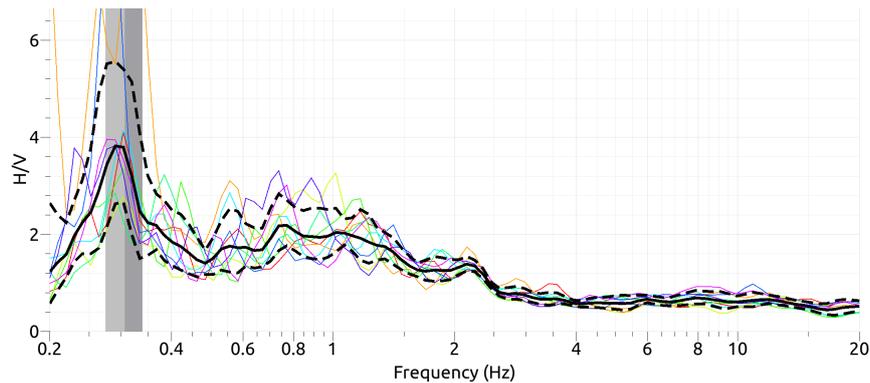


Figure 40 : Courbe H/V de la mesure réalisée sur la dalle sur laquelle est posée la table vibrante. Production personnelle

2.4.2 Mesures sur la passerelle de l'Île d'Amour

Dans le cadre de leur TIPE²¹, deux étudiants en classe préparatoire PTSI (Physique, Technologie et Science de l'Ingénieur) au Lycée Vaucanson ont sollicité le laboratoire 3SR afin de réaliser des mesures de fréquence propres de ponts. J'ai donc accepté de les encadrer, et nous avons décidé d'aller réaliser des mesures sur la passerelle piétonne et cyclable reliant le domaine universitaire et le parc de l'île d'Amour.

Il s'agit d'un pont haubané en semi-harpe, construit en 1980 et composé d'un tablier en béton précontraint, de pylônes en béton armé et de câbles en acier. Elle traverse l'Isère avec une portée principale de 79 m et sa longueur totale est de 119 m.

Nous avons réalisé des mesures par bruit de fond sur cinq points stratégiques sur le pont :

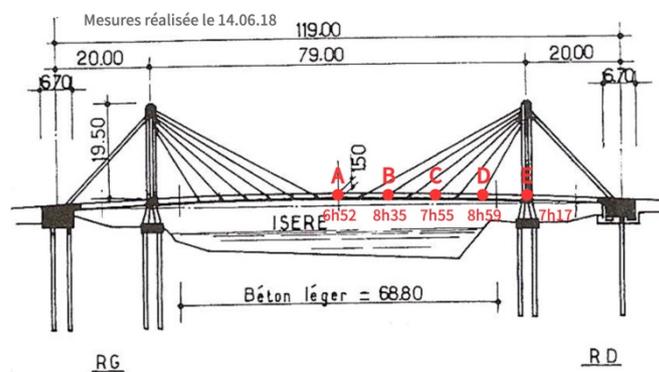


Figure 41 : Mesures réalisées sur la passerelle de l'Île d'Amour. Production personnelle

²¹ Travaux d'Initiative Personnelle Encadrés, évalués au concours des grandes écoles par une épreuve orale

Je leur ai ensuite transmis les fichiers de mesure afin que nous analysions de manière indépendante les résultats, puis que nous en discutions. J'ai commencé par tracer les spectres de Fourier pour chacune de mesures séparément (tous les graphes sont présentés en annexe G). On remarque alors qu'il y a très peu de mouvements selon l'axe longitudinal au pont, ce qui paraît plutôt logique étant donné que le tablier s'appuie sur les butées. Selon l'axe transversal, on observe une plus grande quantité de pics, globalement répartis entre 1 Hz et 15 Hz. Plus précisément, on identifie les pics suivants :

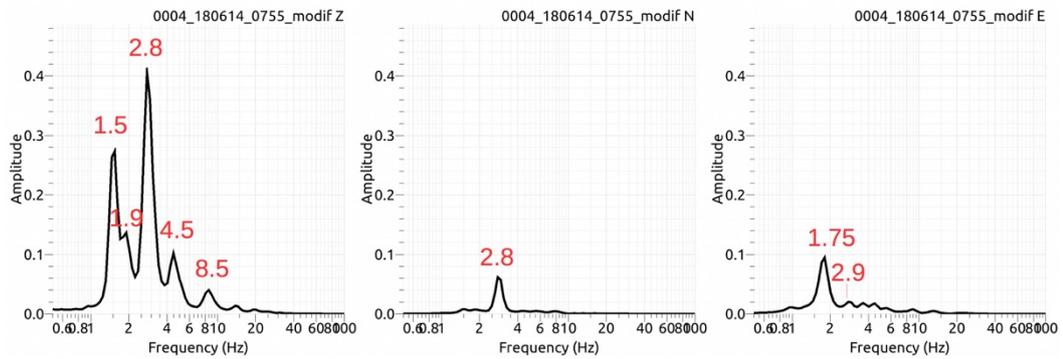


Figure 42 : Identification des pics de fréquence sur le spectre au point C. Production personnelle

Au niveau du pylône rive droite (point E), on observe moins de pics, et ces derniers ont une amplitude bien plus faible que sur les spectres des autres points de mesure, ce qui paraît logique car en théorie, ce pylône constitue un nœud pour les modes de vibration de la passerelle.

En analysant les résultats obtenus, on peut en déduire les modes de vibration verticaux suivants :

- Mode 1 à 1,5 Hz : ce pic est le plus grand (attention tout de même aux valeurs de gain) sur les spectres des points A et B, qui sont dans le ventre du mode
- Mode 2 à 2,8 Hz : ce pic est beaucoup plus petit sur le spectre du point A au centre du pont qui est (à peu près) sur un nœud du mode alors qu'il est très prononcé sur les spectres des points B, C et D qui sont dans le ventre
- Mode 3 et 4 à respectivement 4,5 Hz et 8,4 Hz : les pics correspondant à ces modes sont d'amplitude plus faible que pour les autres modes, et ils apparaissent sur la plupart des spectres

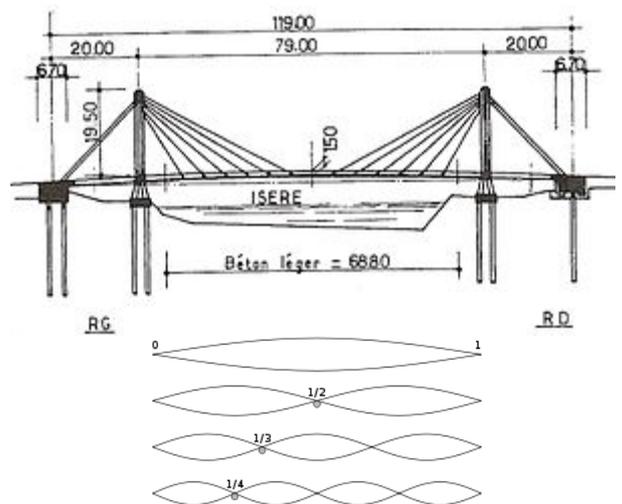


Figure 43 : Rappel de l'allure des premiers modes.

Source : Google images

En théorie, on devrait avoir un rapport de 2 entre les fréquences obtenues ($f_1 = 2f_0$, $f_2 = 2f_1$ etc), mais cela par du principe que la structure vibre idéalement avec des nœuds absolus au niveau des pylônes, ce qui n'est pas tout à fait le cas. On a ici plutôt un rapport entre les modes compris entre 1,6 et 1,9.

Par ailleurs, on voit sur la plupart des spectres verticaux un pic à $1,9 \text{ Hz}$, de plus faible amplitude que ceux correspondant deux premiers modes. On ne peut pas facilement justifier la présence de ce pic avec cette courte étude, d'autant plus que si on étudie les spectres avec un filtre ne gardant que les fenêtres (de 60s) dans lesquels l'amplitude du signal est quasi-stationnaire, on obtient les spectres suivant :

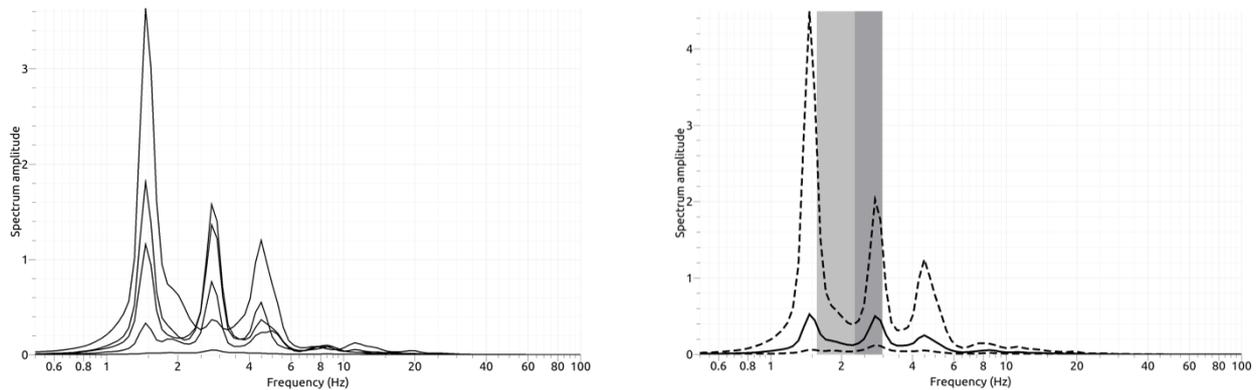


Figure 44 : Spectres des signaux verticaux quasi-stationnaires. Production personnelle

Le pic à $1,9 \text{ Hz}$ n'apparaît plus, et on voit bien les trois premiers modes verticaux, avec une amplitude qui décroît.

En ce qui concerne les modes verticaux, il est plus difficile de les identifier car les amplitudes des pics sont plus faibles. On arrive tout de même à identifier un premier mode à $1,8 \text{ Hz}$, et un second à environ $3,6 \text{ Hz}$.

On peut aussi noter qu'au niveau du pylône rive droite, on s'attendait à ne voir quasiment aucun pic, et on voit finalement sur les spectres un pic à $2,8 \text{ Hz}$, mais de très faible amplitude. En effet, si on revient au millivolts mesurés par le capteur, pour le point E, le pic a une amplitude de seulement 4% par rapport à ce même pic au point B.

Finalement, on a trouvé pour la passerelle les trois premiers modes verticaux avec des fréquences comprises entre $1,5 \text{ Hz}$ et $4,5 \text{ Hz}$, or dans l'ouvrage *Contrôle vibratoire des passerelles piétonnes – Guide de dimensionnement* (Hivoss, 2007), on peut lire que la plage critique de fréquence propre pour une passerelle piétonne excitée par des piétons est entre $1,25 \text{ Hz}$ et $2,3 \text{ Hz}$. Et si on considère le second harmonique, cette plage s'étend à $4,6 \text{ Hz}$. Les modes propres obtenus se situent dans ces gammes, et nous avons pu le remarquer pendant nos mesures, lorsque certains coureurs passaient et mettaient le pont en vibration. Selon les personnes, les secousses étaient plus ou moins importantes, et certaines mesures ont parfois été saturées.

Enfin, à l'aide du manuel d'utilisation que j'ai créé dans le cadre de mon stage, les deux étudiants ont pu manipuler le matériel et réaliser les mesures eux-mêmes. Ils m'ont fait un retour positif de cette fiche, qui sera ensuite à disposition des étudiants de l'université de Grenoble lors de travaux pratiques.

3. Modélisation numérique de la Maison en Terre

Après avoir estimé manuellement la fréquence de résonance à laquelle on peut s'attendre pour la Maison en Terre, et après avoir réalisé des mesures *in situ*, il est intéressant de créer un modèle éléments finis de cette maison. Une analyse modale avec cette modélisation numérique permettra d'obtenir les fréquences propres de la maison, qui pourront alors être comparées avec les résultats obtenus précédemment.

3.1 Modélisation de la géométrie avec Robot puis Code_Aster

3.1.1 Modélisation sur Revit et Robot Structural Analysis

La première idée a été d'utiliser la suite Autodesk, en modélisant la structure de la maison sur Revit, puis en la transférant le modèle vers Robot Structural Analysis pour l'analyse modale. En 2016, un groupe d'étudiants de l'IUT 1 de Grenoble avait déjà tenté de le réaliser, mais la modélisation de la toiture complexe (coupes et voûtes) avait vite posé problème. En effet, lorsque le modèle est exporté depuis Revit, Robot ne reconstitue pas correctement la géométrie de la toiture, qui avait été créée à l'aide de blocs volumiques non structurels.

J'ai donc décidé de télécharger la toute dernière version de Robot et Revit (version 2019) et de recréer un modèle avec différentes techniques pour le toit, puis de tenter à nouveau l'exportation vers Robot, en espérant que les bugs de la version 2016 avaient été corrigés. J'ai alors essayé de créer l'une des voûtes du toit à l'aide de différentes techniques (élément volumique, composant « mur »), mais à chaque fois, l'exportation vers Robot ne fonctionnait pas, car le logiciel ne le reconnaissait pas comme élément structurel.

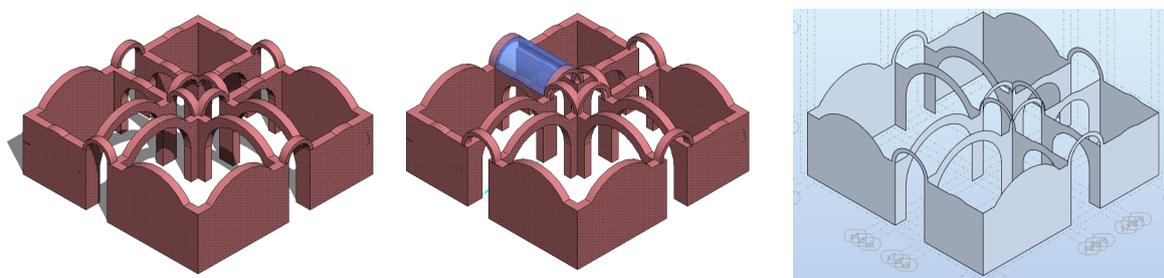


Figure 45 : Modélisation de la maison sous Revit et Robot. Production personnelle

J'ai donc tout de même exporté le modèle avec les murs, et j'ai voulu créer le toit directement sur Robot, mais le logiciel n'était pas adapté pour la création d'éléments structurels avec ce type de géométrie. Cette première idée a donc été abandonnée, et nous avons décidé avec Dominique DAUDON de créer un modèle numérique à l'aide d'un autre logiciel plus adapté.

3.1.2 Modélisation avec Code_Aster et Salome Meca

Étant donné que j'avais eu l'occasion d'utiliser Code_Aster dans le cadre du cours d'Éléments Finis Appliqués aux Structures à l'ENTPE, nous avons décidé que je développerai un modèle éléments finis de la maison en terre sur ce logiciel. Il s'agit d'un logiciel libre de simulation numérique développé par le service recherche et développement d'EDF. Dans sa dernière version, la création de la géométrie et du maillage, l'écriture du fichier de commande mais également la lecture des résultats se font désormais à travers l'interface Salome Meca (version 8), qui est également une plate-forme gratuite et libre.

J'ai donc commencé à créer la géométrie, ce qui m'a pris un peu plus d'une semaine pour avoir un modèle relativement conforme à la géométrie réelle de la maison, et ne générant aucune erreur pour le maillage. La maison est alors modélisée en créant des solides correspondant à tous les sous-éléments de la structure, puis en les 'découpant' pour qu'il n'y a pas de chevauchement de volumes et enfin en les fusionnant pour finalement créer un seul solide final. J'ai ensuite généré un premier maillage simple (NETGEN 1D-2D-3D, max size=0.2, very fine) pour pouvoir lancer les premières analyses.

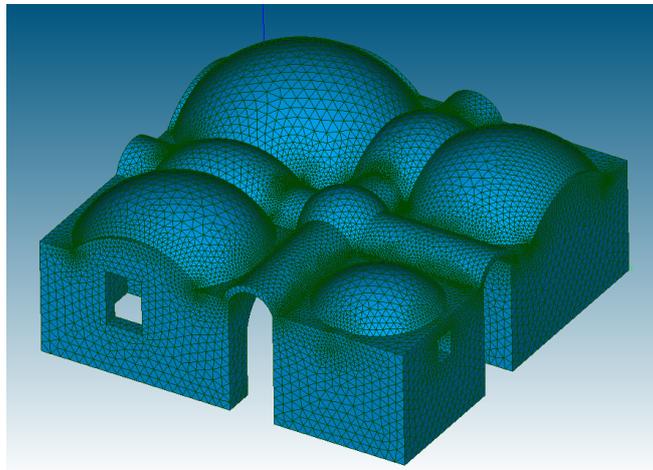


Figure 46 : Maillage de la maison. Production personnelle

Avant de détailler les études statiques et les analyses modales réalisées, il est important de noter qu'avec ce type de modélisation, les briques de terre comprimées (BTC) et les joints ne sont pas modélisés séparément, et on fait donc l'hypothèse que la maison est composée d'un matériau homogène ayant les mêmes propriétés que les BTC. De plus, on ne prend pas en compte les interactions avec le sol puisque l'on 'encastre' la maison à sa base. Les interactions sol-structure décrites par Philippe GUEGUEN dans ses différents travaux ne peuvent donc pas être modélisées.

Enfin, dans les études qui vont suivre, les seuls paramètres pouvant varier sont le maillage de la maison (finesse, taille maximale des mailles, etc.), les conditions aux limites (liaisons et chargements), ainsi que le module de Young, le coefficient de Poisson et la masse volumique du matériau utilisé.

3.2 Étude statique et modale de la Maison en Terre

3.2.1 Étude statique brève de la maison

Avant de réaliser l'analyse modale, j'ai commencé par faire une analyse statique simple pour vérifier la cohérence de mon modèle. Pour commencer, j'ai choisi comme paramètres pour le matériau BTC ceux évoqués précédemment, c'est-à-dire :

- Un module de Young $E = 2000 \text{ MPa}$
- Un coefficient de Poisson $\nu = 0,2$
- Une masse volumique $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$

J'ai donc tout d'abord calculé les contraintes et les déplacements avec pour seule action extérieure la gravité. On obtient des résultats qui, intuitivement, semblent corrects. Les plus grands déplacements sont globalement localisés vers la plus grande coupole (au maximum $0,27 \text{ mm}$) et les contraintes les plus élevées se situent au niveau des arches intérieures et au niveau des poteaux centraux (au maximum $0,325 \text{ MPa}$), qui reprennent une grande partie des charges du toit.

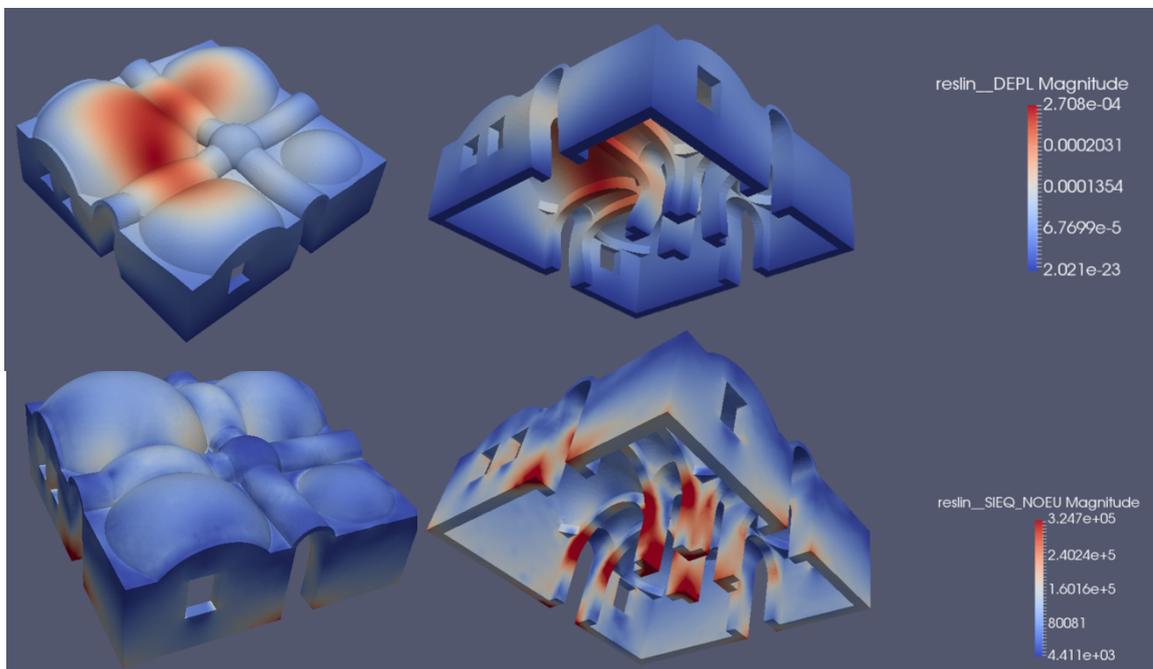


Figure 47 : Déplacements (en haut) et contraintes (en bas) de la maison. Production personnelle

Au niveau du poteau central à l'angle de la plus grande coupole, on trouve des contraintes maximales de 325000 Pa , soit $0,325 \text{ MPa}$. Or dans les calculs de descente de charge effectués lors de la conception de la maison en terre, on a à ce même poteau une descente de charges verticale de $5,22$ tonnes sans toit et sans surcharges dues à la neige, et de $7,22$ tonnes avec toiture et surcharges. La section de ce poteau est d'environ $0,27 \text{ m}^2$, ce qui nous donne donc respectivement des contraintes verticales de $0,19 \text{ MPa}$ et $0,27 \text{ MPa}$. La valeur maximale obtenue numériquement est légèrement au

dessus de celles calculées lors de la conception, mais cela reste dans le même ordre de grandeur. De plus, la valeur numérique est seulement une valeur maximale, or on voit sur la figure ci-dessous que les contraintes ne sont pas constante. En moyennant celles-ci sur la surface de section du poteau, on retrouverait probablement une valeur proche de celle obtenue par calcul de la descente de charges.

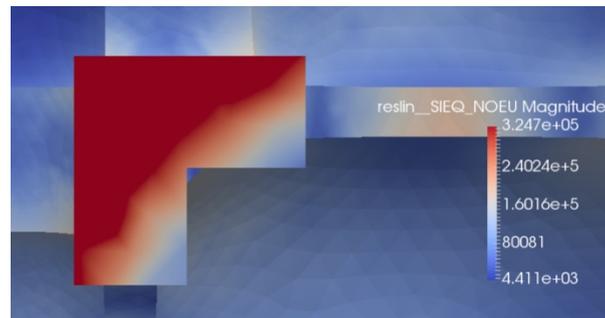


Figure 48 : Contraintes dans l'un des poteaux centraux.
Production personnelle

3.2.2 Analyse modale de la maison seule

Après avoir validé mon modèle grâce à une courte étude statique, j'ai étudié les fréquences propres de la maison à l'aide d'une analyse modale toujours sur Code_Aster. J'ai également réalisé quelques analyses paramétriques pour avoir une idée de l'influence du maillage et des données du matériau sur les modes obtenus.

J'ai d'abord décidé de calculer l'ensemble des modes sur la bande de fréquence 1 Hz - 100 Hz, mais la console m'indiquait qu'il y avait potentiellement un trop grand nombre de résultats, et qu'il fallait réduire soit la gamme de fréquence, soit appliquer un filtre. J'ai donc ajouté un critère sur la masse effective du mode : seuls les modes avec une masse effective (selon X, Y ou Z) supérieure à 5% sont retenus. J'ai alors obtenu les 7 modes suivants (sur 78 trouvés au total) :

N° MODE	F (Hz)	MASS_EFFE_UN_DX	CUMUL_DX	MASS_EFFE_UN_DY	CUMUL_DY	MASS_EFFE_UN_DZ	CUMUL_DZ
1	19,02	46,46%	46,46%	17,12%	17,12%	0,00%	0,00%
2	19,11	17,17%	63,63%	46,79%	63,92%	0,00%	0,00%
4	30,20	0,05%	63,68%	0,00%	63,92%	6,22%	6,22%
21	52,88	0,00%	63,68%	0,00%	63,92%	7,68%	13,90%
23	57,23	0,16%	63,84%	0,04%	63,96%	9,72%	23,62%
37	69,05	0,09%	63,93%	0,19%	64,15%	6,51%	30,13%
56	84,81	0,14%	64,07%	0,03%	64,18%	6,76%	36,89%

Figure 49 : Fréquences et masses effectives modales des 7 premiers modes de la maison. Production personnelle

Ces fréquences sont toutes largement au dessus des 9 Hz que l'on attendait, mais avant d'essayer de comprendre pourquoi il y a une telle différence, nous allons d'abord étudier les résultats obtenus.

On remarque que les deux premiers modes selon les directions X et Y représentent à eux seuls environ 64% de la masse effective totale. Ce sont donc les plus représentatifs du comportement de la maison. Les cinq autres fréquences propres correspondent à des modes verticaux, avec des masses effectives comprises entre 6 et 10%. Il n'y a donc pas un mode vertical qui se distingue réellement des autres.

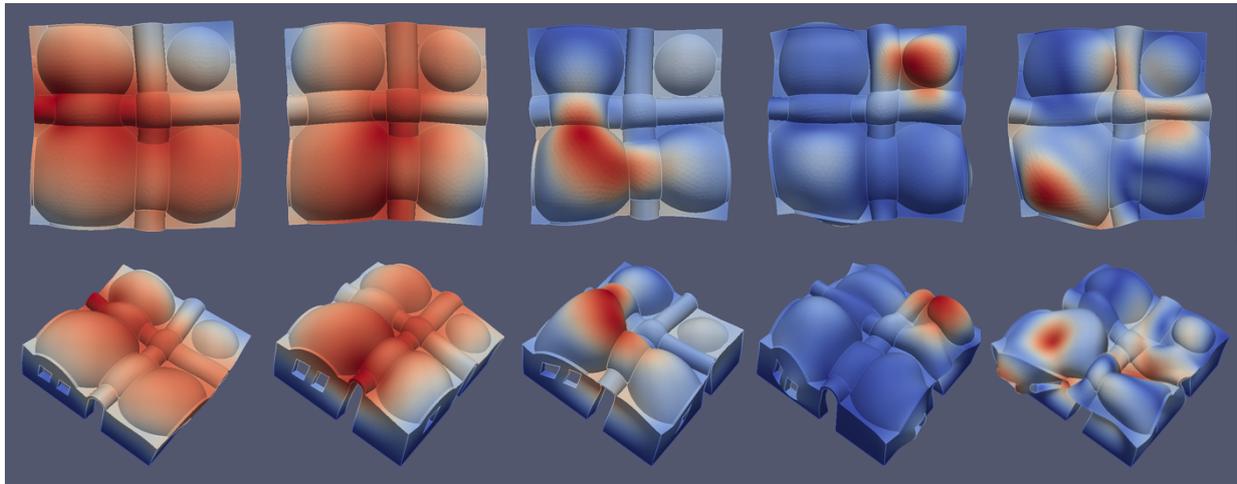


Figure 50 : Déformées des 5 premiers modes propres de la maison. Production personnelle

En observant les allures des déformées de ces quelques modes, on voit bien que les deux premiers sont des modes de déformation quasi-unilatéraux, avec très peu de torsion. Ceux-ci ont des fréquences propres très proches, et des déformées similaires, mais cela paraît plutôt logique étant donné que la maison possède un axe de symétrie. C'est d'ailleurs très probablement ces deux modes que l'on a détecté à 9 Hz lors des mesures expérimentales. Les déformations des deux modes suivants sont quant à elles plutôt localisées au niveau de deux des coupoles du toit, tandis que les derniers semblent être des modes 'mixtes'.

Lorsque l'on étudie le comportement sismique d'un bâtiment, il est préférable de considérer l'ensemble des modes qui cumulent plus de 90% de la masse modale totale. Etant donné qu'avec ces sept premiers modes la masse cumulative atteint au maximum 64,18%, j'ai décidé de diminuer le seuil établi précédemment à 5%, et donc d'augmenter le nombre de modes étudiés. Selon les deux directions horizontales, je n'ai obtenu que des modes ayant une masse effective inférieure à 2,62%, dont seulement cinq au dessus de 1%, et qui sont donc des modes que l'on va qualifier de "mineurs". Selon l'axe vertical, un plus grand nombre de modes ont une masse effective supérieure à 1%, avec cependant aucun d'entre contribuant à plus de 10%. Il n'y a donc pas de fréquences distinctive selon cette direction. La courbe ci-dessous montre l'évolution des masses effectives cumulées selon le pourcentage de modes retenus :

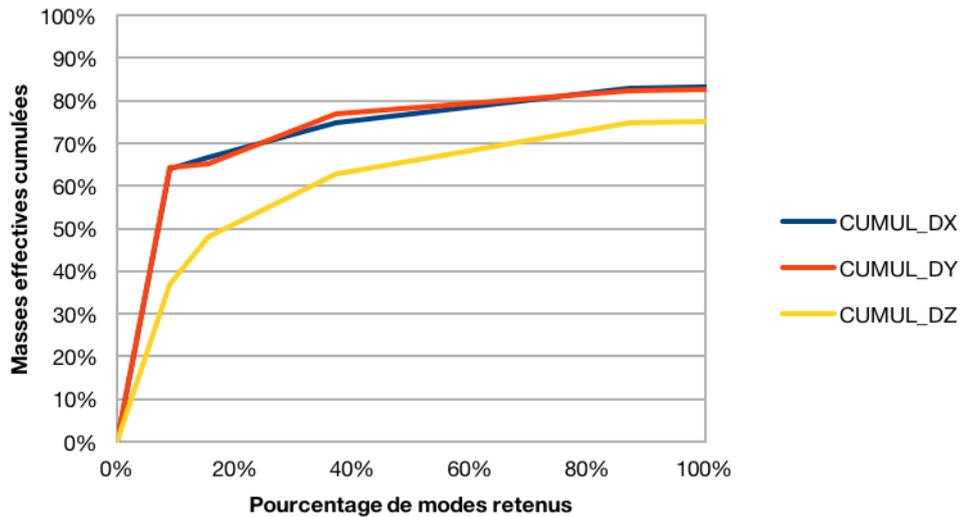


Figure 51 : Masses effectives cumulative selon le pourcentage de modes retenus. Production personnelle

Entre 10 Hz et 100 Hz, la totalité des modes propres contribuent donc selon les trois directions à hauteur de 83,15%, 82,57% et 75,19%. La majorité de la masse modale correspond donc à des fréquences propres se trouvant donc dans cette gamme. En modifiant dans le fichier de commande la bande de fréquence d'étude, on trouve qu'il n'existe aucun mode propre de la maison en dessous de 10 Hz, et qu'il en existe 163 entre 100 Hz et 200 Hz, sans qu'aucun d'entre eux aie une masse effective supérieure à 1%. Les modes les plus importants sont donc bien ceux présentés ci-dessus, et si l'on souhaitait étudier l'ensemble des modes qui contribuent à plus de 90 % de la masse modale totale, leur nombre serait trop important (plus d'une centaine).

J'ai donc ensuite gardé les cinq premiers modes avec les plus grandes masses effectives (les cinq premières du tableau précédent) pour réaliser les analyses paramétriques. J'ai d'abord commencé par étudier l'influence du maillage sur les fréquences propres. Les caractéristiques des maillages créés (des courbes supplémentaires sont présentées en annexe H) et les résultats obtenus sont les suivants, avec le maillage « Fin » étant celui utilisé jusqu'à maintenant :

Description	Type de maillage	Dim min (m)	Dim max (m)	Finesse	Number of nodes
Très grossier	NETGEN 1D-2D-3D	0,4	5	Very Coarse	2063
Grossier	NETGEN 1D-2D-3D	0,1	0,5	Coarse	7672
Fin	NETGEN 1D-2D-3D	1,00E-04	0,2	Very Fine	88609
Très fin	NETGEN 1D-2D-3D	1,00E-09	0,1	Very Fine	109621
Extra fin	NETGEN 1D-2D-3D	1,00E-12	0,05	Very Fine	301828

Figure 52 : Caractéristiques des maillages réalisés. Production personnelle

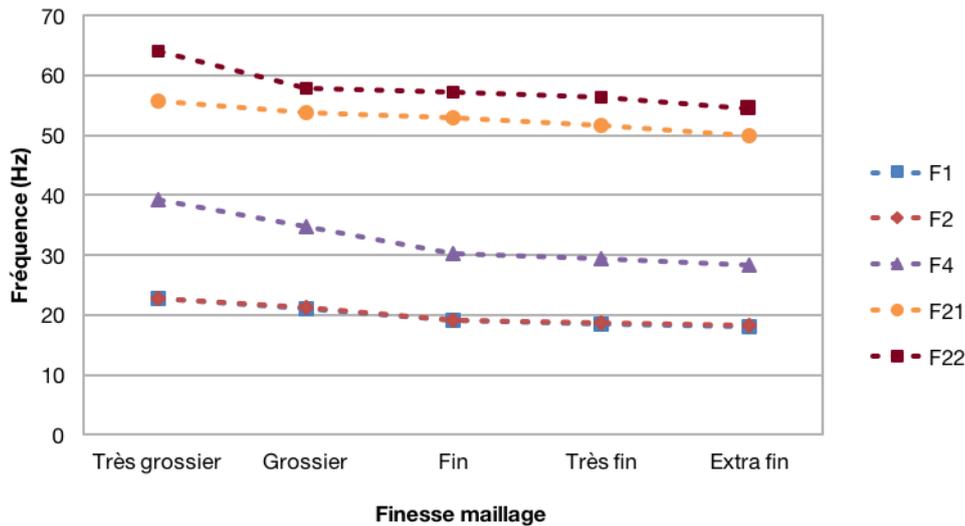


Figure 53 : Valeur des cinq premières fréquences propres en fonction du maillage. Production personnelle

On remarque alors qu'il y a une baisse de l'ordre de 20% pour les deux premières fréquences propres entre le maillage très grossier et le maillage très fin. En revanche, pour ces mêmes modes, on a une variation de seulement 2% entre le maillage très fin et extra fin. Une analyse avec le maillage fin semble donc déjà très correcte. Par ailleurs, on observe que la plus grande différence concerne la troisième fréquence propre, qui diminue de 28% entre les deux maillages les plus extrêmes de l'étude, mais on a à nouveau peu de variations à partir du maillage très fin. C'est donc ce dernier que l'on va utiliser dans la suite de l'étude.

J'ai ensuite modifié les valeurs de la masse volumique et du coefficient de poisson du matériau, et les résultats sont les suivants :

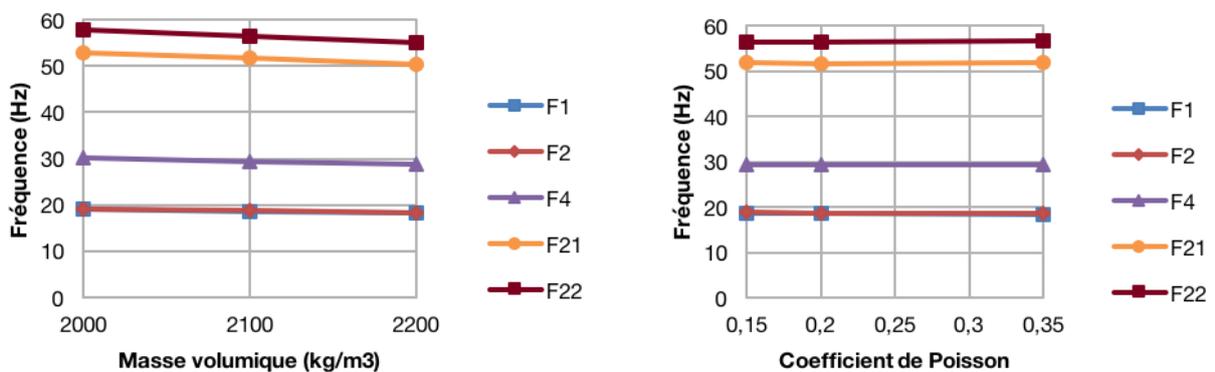


Figure 54 : Influence de la masse volumique et du coefficient de Poisson du matériau sur les cinq premières fréquences propres. Production personnelle

On constate que le coefficient de Poisson n'influe que très peu sur les fréquences, avec des variations de l'ordre de seulement 1%. La masse volumique a quant à elle légèrement plus d'influence. Si l'on diminue celle-ci de 18% (de 2200 MPa à 1800 MPa), les fréquences baissent de 11%, ce qui est

raisonnable. Mais cette masse volumique dépend fortement de la manière à laquelle les briques ont été fabriquées et comprimées, et elle est donc liée au module de Young. C'est donc ce paramètre que nous allons désormais étudier.

Depuis le début de cette étude, j'ai fait l'hypothèse que le matériau qui constitue la maison avait un module d'élasticité de 2000 MPa . Mais en explorant quelque peu la littérature, on se rend compte que selon le mode de compression, la qualité de la terre, l'ancienneté de la fabrication, etc., le module de Young pouvait fortement varier. J'ai donc décidé d'observer son influence en le faisant varier de 600 MPa à 2500 MPa .

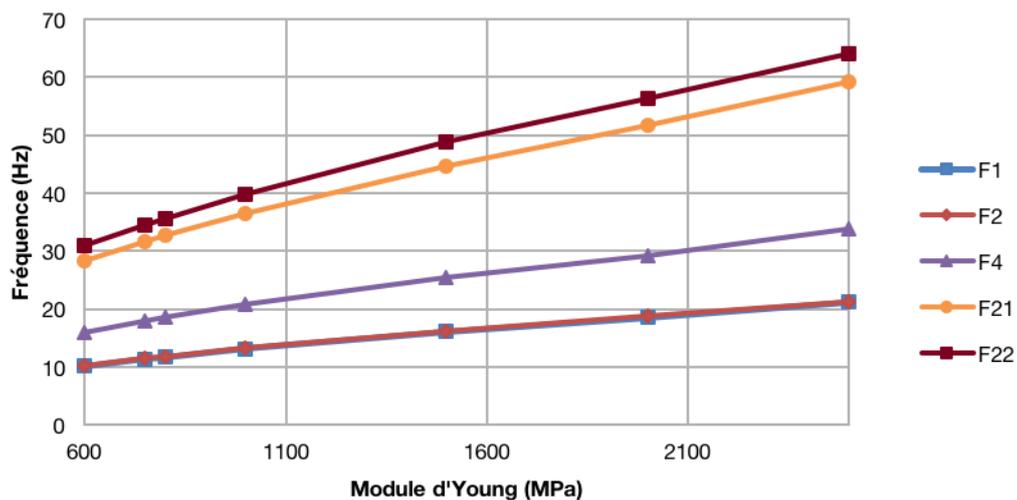


Figure 55 : Influence du module de Young sur les cinq premières fréquences propres. Production personnelle

On s'aperçoit alors que le module de Young a un rôle important dans la détermination des fréquences propres. En effet, avec un écart de 1800 MPa sur le module d'élasticité, la fréquence peut aller du simple au double. Si on fait une analogie avec la première fréquence propre d'un modèle à un degré de liberté qui est égale à $\sqrt{k/m}$ on peut en déduire, qu'à masse constante, une baisse de fréquence correspond à une diminution de la raideur. Or l'endommagement d'une structure correspond à une baisse de sa rigidité, donc il est possible que la maison ait des fréquences propres réelles plus basses que dans la modélisation numérique en partie à cause des dégradations qu'elle a subit pendant trente ans de vie, dont deux sans la toile de protection.

Dans la littérature, que ce soit pour le module de Young ou pour la masse volumique, les valeurs utilisées sont très variées, et aucune brique similaire à celles utilisées lors de la construction de la maison n'a été conservée. Ce qui fait qu'il est difficile d'estimer le module d'élasticité réel de la maison en 1986 et à l'heure actuelle. Le modèle éléments finis a donc été basé sur des valeurs quelque peu arbitraires, et si on veut que celui-ci 'colle' plus à la réalité, cela voudrait donc dire que la Maison en Terre aurait aujourd'hui un module d'Young plus proche de 600 MPa , voire moins, que de 2000 MPa . Pour savoir si c'est une hypothèse probable, il faut d'abord voir si les actions extérieures, et notamment celles dues à la toile, ne sont pas les causes de ces différences de fréquence.

3.3 Étude de l'influence de la toile de protection

3.3.1 Étude statique de la toile

Pour pouvoir avoir une idée de l'influence de la toile en PVC sur les modes propres de la Maison en Terre, je l'ai modélisée pour réaliser une étude statique. En effet, dans le Dossier Consultation des Entreprises (DCE) de 1988, il est demandé à l'entreprise de fournir le calcul des descentes de charges sur les deux poteaux centraux du bâtiment, mais nous n'avons pas réussi à nous les procurer, et il faut donc également estimer ces charges à l'aide d'un modèle numérique. Les forces résultantes dues aux actions de la gravité, du vent et de la neige sur la toile devront ensuite être ajoutées sur le modèle de la maison pour l'analyse modale, car elles risquent d'avoir une influence sur les résultats.

Tout d'abord, j'ai trouvé plusieurs indications quant à la toile utilisée dans le DCE de 1988. Dans celui-ci, il est spécifié qu'il doit s'agir d'une membrane précontrainte en polyester mille deniers, enduction PVC, et avec un poids supérieur à 700 g/m^2 et une résistance supérieurs ou égale à 280 kg/5cm en chaîne et en trame. La membrane doit également avoir un traitement anti-UV et anti-fongique, une finition par vernis acrylique anti-poussières sur les deux faces. Il est également précisé que ce doit être une membrane type 702 biface de la marque Ferrari. Comme nous n'avons pas non plus à disposition de document spécifiant quelle toile a été choisie, j'ai moi-même sélectionné une toile respectant ces critères. Il s'agit de la membrane Précontraint 702S de la marque Ferrari.

J'ai voulu commencer par modéliser la toile par une membrane avec Code_Aster, mais plusieurs difficultés apparaissaient alors. La première était lors de la définition du matériau. En effet, étaient demandés, en plus de la densité surfacique de la toile, les coefficients de la matrice de rigidité membranaire reliant les contraintes membranaires aux déformations pour les éléments de membrane. Or, peu de documentation est disponible pour détailler le contenu de cette matrice, et peu de données sont disponibles sur pour ce type de toile. De plus, certains types de chargements (application d'une pression sur une face par exemple) s'avèrent ne pas être adaptés à ce type de modélisation, et il les conditions aux limites correspondant au plus près de la réalité (quatre poteaux et l'arc diagonal fixes) ne suffisaient pas pour les calculs (problème de matrice singulière ou presque singulière). On m'a alors plutôt conseillé de modéliser plus simplement en 3D, où le coefficient de Poisson et le module de Young suffisent, et avec les mêmes dimensions.

La documentation sur le produit ne donne que la masse surfacique (et l'épaisseur), la résistance à la traction et la résistance au déchirement, mais pas de module d'élasticité et de coefficient de Poisson. J'ai donc dû me référer à la littérature, dans laquelle j'ai pu me rendre compte que ce type de matériau avait deux module de Young et deux coefficients de Poisson selon la direction du fil de chaîne (*warp*) et du fil de trame (*weft*). Mais dans leurs travaux de 2014 et 2015, Tien Dung DINH et al. utilisent pour leur modèle numérique un coefficient d'élasticité efficace calculé à partir de tracés de courbes contrainte-déformation pour l'extension uniaxial en biais. En ce qui concerne le coefficient de Poisson, j'ai choisi de prendre une valeur qui correspond à la moyenne des différentes mesures. J'ai donc pris pour l'étude de la toile $E = 300 \text{ MPa}$ et $\nu = 0,2$.

J'ai ensuite récupéré la géométrie plane précédemment créée, et je l'ai extrudée de 1 mm avant de la mailler. Mais le maillage (plus ou moins automatique) n'était pas adapté, et semblait traiter difficilement la grande différence de dimension entre les longueurs et l'épaisseur de la toile. J'ai donc préféré extruder directement le maillage surfacique avec une seule discrétisation sur l'épaisseur. J'ai alors obtenu le maillage suivant :

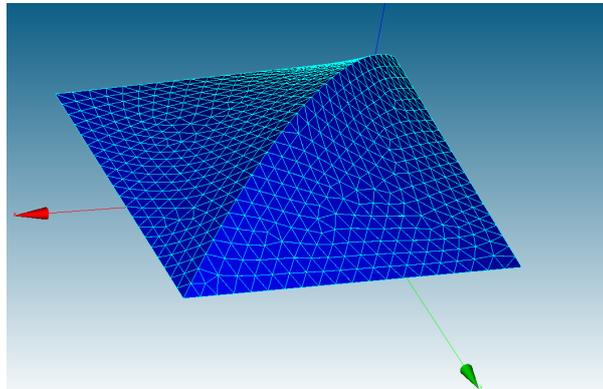


Figure 56 : Maillage de la toile de protection. Production personnelle

Puis, j'ai à nouveau créé un fichier de commande pour obtenir les déplacements et les contraintes pour les différents cas suivants :

- Action de la gravité seule (G)
- Action de la gravité et de la neige (G+N)
- Action de la gravité et du vent (G+V)
- Action de la gravité, de la neige et du vent (G+N+V)

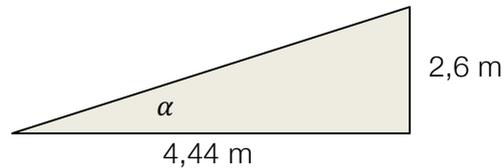
Pour faire cela, il faut donc évaluer les surcharges dues à la neige sur le toit et à l'action du vent.

Dans le DCE de 1988, il est spécifié que la confection de l'ensemble devra respecter la réglementation neige de 1984. Nous allons donc effectuer les calculs selon cette norme. Dans cette réglementation, Grenoble (et plus globalement l'Isère) se situe dans la zone B, ce qui nous donne²² directement une surcharge normale de neige de 450 N/m², qu'il faut appliquer selon l'axe vertical. À titre de comparaison, nous allons calculer la surcharge de neige selon la norme actuelle, qui est l'Eurocode 1 (EN 1991 NA 2007). Cette surcharge est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$s = \mu_1 \cdot c_e \cdot c_t \cdot (s_k + \Delta s_1)$$

²² Source : <https://www.icab.fr/guide/nv65/neige.html>

Les coefficients c_e et c_t sont respectivement un coefficient d'exposition et un coefficient thermique, que nous prenons tous deux égaux à 1. Dans le zonage actuel, Grenoble se trouve en zone C2, ce qui nous donne comme valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol à une altitude inférieure à 200 m $s_k = 0,65$. De plus, comme on se trouve entre 200 m et 500 m d'altitude, on a une surcharge $\Delta s_1 = 0,1 \frac{A-200}{100} = 0,1 \frac{210-200}{100} = 0,01$. Enfin, il nous faut le coefficient de forme μ_1 qui dépend de la pente de la toiture. Comme la toiture n'a pas une pente constante, nous allons simplifier la modélisation pour le calcul de la surcharge. Nous supposons donc que la pente est constante et égale à la pente entre le point le plus haut (point culminant de l'arc diagonal) et le point le plus bas (poteau à l'angle vers la plus petite coupole). On a donc le schéma suivant :



Ce qui nous donne une pente $\alpha = 33,5^\circ$. Et on a alors $\mu_1 = 0,8 \frac{60-\alpha}{30} = 0,71$.

On a donc finalement $s = 466 \text{ N/m}^2$, soit 3.5% de plus qu'avec la norme de 1984, ce qui est tout à fait raisonnable.

En ce qui concerne le vent, il est spécifié dans le DCE que la confection de l'ensemble devra respecter la réglementation vent de 1965. Mais le calcul étant relativement complexe, j'ai utilisé un outil de calcul des pressions de vent selon Eurocode 1, sur le site de l'ICAB²³, qui est une société qui développe un logiciel de calcul de structure basé sur la méthode des éléments finis.

En indiquant les données nécessaires :

- Grenoble est en région 1 et la maison en terre se situe en zone III (zone urbanisée)
- Hauteur d'environ 4 m par rapport au sol
- Altitude de 210 m au dessus du niveau de la mer
- Terrain plat

On obtient une valeur de pression dynamique de pointe à l'ELS de 379.7 N/m^2 (équivalent à un vent d'une vitesse $v_p = 24,9 \text{ m/s} = 89,6 \text{ km/h}$), qui doit être appliquée selon la normale de la toiture.

En choisissant le cas le plus défavorable pour la structure - c'est-à-dire avec le vent qui arrive selon la direction orthogonale au tube diagonal, avec une pression positive sur l'une des faces, et une pression négative sur l'autre - les actions extérieures peuvent être schématisées de la manière suivante :

²³ <http://icab.fr/guide/calc/index.php>

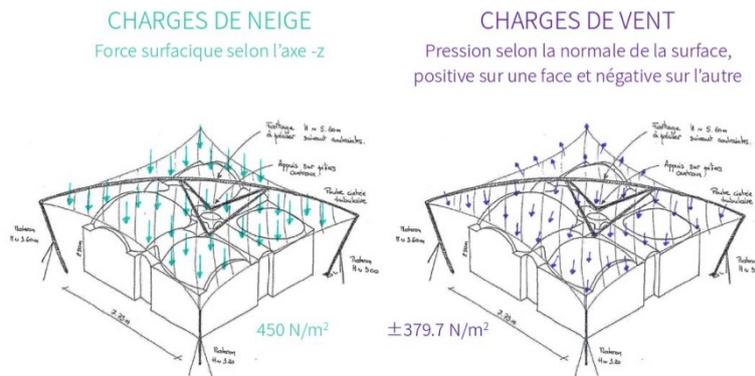


Figure 57 : Schématisation des surcharges dues au vent et à la neige.
Production personnelle

En ce qui concerne les conditions aux limites, j'ai choisi d'imposer des liaisons rotules aux quatre angles de la toile et au niveau de l'arc diagonal :

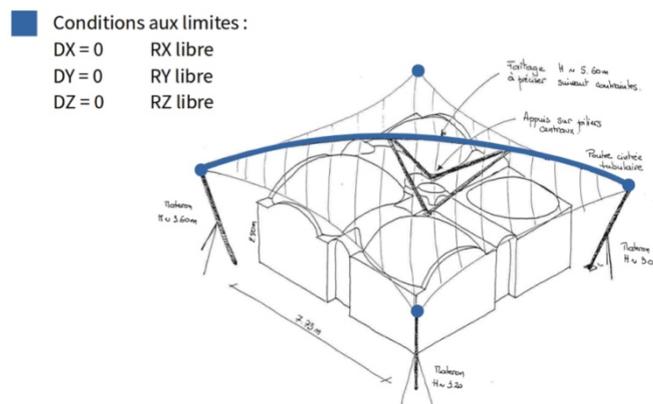


Figure 58 : Schématisation des conditions aux limites de la toile.
Production personnelle

De plus, on suppose que la structure métallique qui supporte la toile est un tube rigide qui a été dimensionnée pour qu'elle n'apporte pas de poids supplémentaire sur la Maison en Terre. En revanche, comme il y a un contact entre les deux éléments, les actions de la gravité, du vent et de la neige seront transmises à la maison, le but étant de savoir quel est leur effet sur ses fréquences propres.

Remarque : J'ai fait le choix de ne pas modéliser la maison et la toile ensemble car cela implique de les relier au niveau des poteaux centraux en imposant une liaison mécanique. Or, comme j'impose des déplacements nuls sur l'arc diagonal, cela aurait aussi été le cas sur les deux points de la maison situés à la base des poteaux, ce qui ne reflète pas correctement la réalité.

Enfin, en plus des déplacements et des contraintes, le programme calcule la somme des forces nodales sur la longueur du tube. On obtient finalement les résultats suivants :

	G	G + N	G + V	G + V + N
Déplacement max (m)	1,03E-02	6,88E-01	7,82E-01	1,37E+00
Déplacement vertical max (m)	9,59E-03	6,41E-01	6,90E-01	1,24E+00
Contrainte max (MPa)	0,715E+05	4,70E+07	4,68E+07	9,28E+07
Contrainte verticale max (MPa)	0,153E+05	1,02E+07	1,10E+07	2,10E+07
SumForce tube X (N)	-8,78E+01	-4,27E+03	-1,82E+06	-1,83E+06
SumForce tube Y (N)	1,92E+02	1,44E+04	1,81E+06	1,83E+06
SumForce tube Z (N)	3,50E+03	2,57E+05	-6,52E+03	2,47E+05

Figure 59 : Déplacements, contraintes et forces selon les cas étudiés. Production personnelle

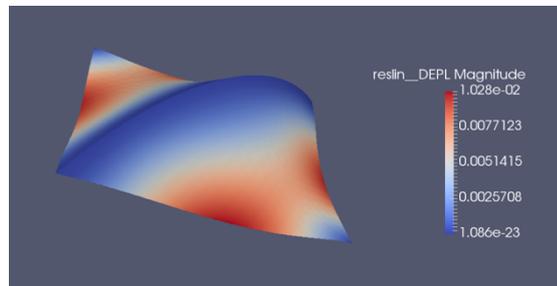


Figure 60 : Déformation de la toile sous son poids propre. Production personnelle

Remarque : Les déplacements maximum sont en valeurs absolues et les contraintes maximales sont généralement localisées aux angles de la toile non connectés au tube diagonal. Des courbes d'analyse de ces résultats sont disponibles en annexe I.

Pour simplifier quelque peu le problème, les forces F_X , F_Y et F_Z seront ensuite réparties sur les deux poteaux aux extrémités du tube et sur ceux au centre de la manière suivante :

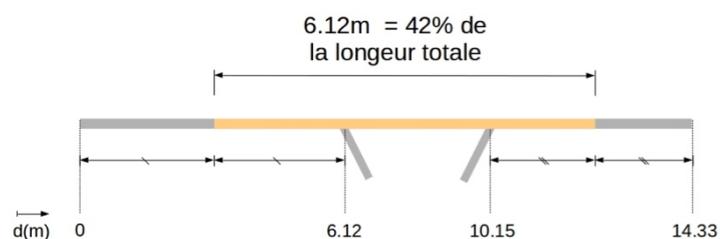


Figure 61 : Répartition des charges sur le tube diagonal. Production personnelle

On appliquera donc 21% de la somme des forces (les moments ne peuvent pas être appliqués sur les nœuds) sur chacun des deux points à la base des tubes métalliques sur le toit de la maison.

3.3.2 Analyse modale de la maison avec les actions extérieures

En gardant les mêmes paramètres que les premières analyses modales - à savoir un maillage très fin, une densité de 2100 kg/m^3 , un module de Young de 2000 MPa et coefficient de Poisson de $0,2$ - et en appliquant les charges calculées ci-dessus, on remarque que, quelque soit le cas considéré, la valeur des fréquences propres ne varient quasiment pas :

		Fréquences (Hz)				
		F1	F2	F4	F21	F22
Actions extérieures	Aucunes	18,58	18,74	29,31	51,63	56,38
	Gravité maison	18,58	18,74	29,31	51,62	56,37
	Gravité maison + toile	18,58	18,74	29,31	51,62	56,37
	Gravité + Neige	18,58	18,74	29,31	51,62	56,37
	Gravité + Vent	18,58	18,74	29,31	51,62	56,37
	Gravité + Neige + Vent	18,58	18,74	29,31	51,62	56,38

Figure 62 : Influence des actions extérieures sur les fréquences propres. Production personnelle

Les actions extérieures ne semblent donc pas - ou très peu - influencer les modes propres de la Maison en Terre. Les forces très probablement sont trop faibles pour modifier le comportement vibratoire de la structure, et même avec 100% des charges appliquées, la différence est infime (moins de 0.02%). On pourrait alors se demander s'il ne fallait pas ajouter une partie du poids propre de la structure métallique mais ce dernier ayant une action verticale, on en déduit intuitivement que cela aurait comme conséquence une potentielle augmentation de la fréquence, car cela aurait tendance à la rigidifier. De plus, il est vrai qu'il n'y avait pas de neige le jour des mesures, et on peut donc se demander si sa modélisation était pertinente. Mais on peut se dire que cette surcharge aurait dans le pire des cas modélisé le poids de la toile et de la structure (même type de force verticale) en l'ayant en plus largement majoré, puisque 450 N/m^2 correspondrait à 45 kg/m^2 , alors que la toile ne pèse que 750 g/m^2 . Donc on peut supposer que le chargement au dessus de la maison n'influe que très peu sur les fréquences propres de celle-ci, et les différences de résultats entre le modèle numérique et la réalité sont donc principalement dues au choix du module de Young (et éventuellement de la masse volumique).

Cependant, sur les spectres de Fourier obtenus à l'aide des mesures sous bruit de fond, on observe plusieurs pics (d'amplitude plus faible que pour le pic à 9 Hz), et notamment un à $2,9 \text{ Hz}$, que l'on ne peut pas expliquer à l'aide de l'analyse modale de la maison seule. On peut donc se demander si ces pics ne sont pas plutôt liés à la vibration de la toile.

3.3.3 Analyse modale de la toile

Pour l'étude de la toile seule, j'ai choisi de calculer les cinq premiers modes de vibration, avec les différentes actions extérieures calculées précédemment. Les allures des déformées des modes sans chargement et les valeurs de fréquences selon les différents cas sont les suivants :

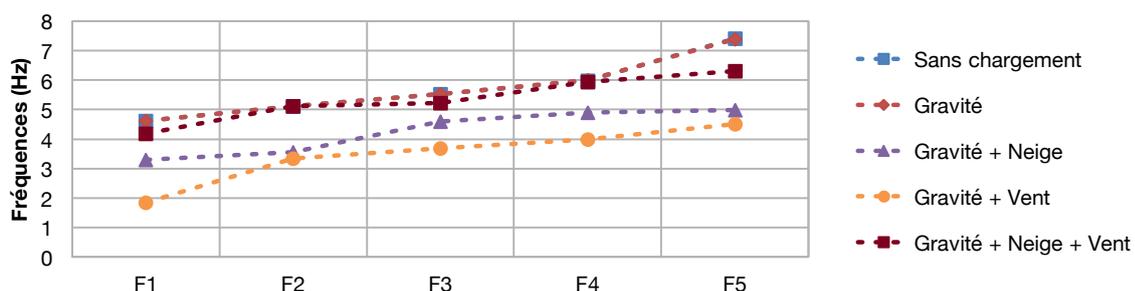


Figure 63 : Fréquences propres de la toile en fonction des actions extérieures. Production personnelle

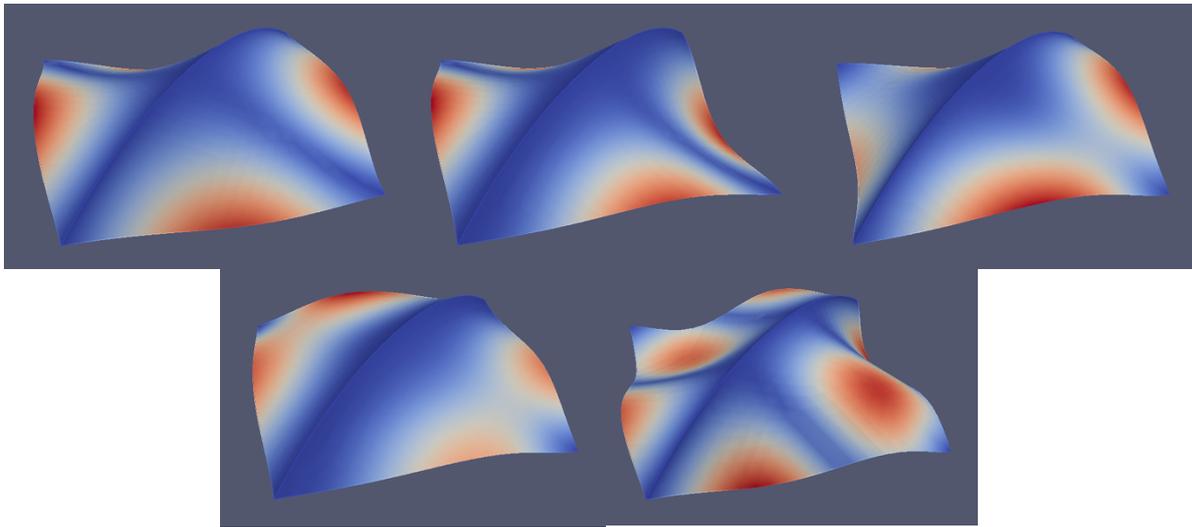


Figure 64 : Les 5 premiers modes de la toile (de gauche à droite et de haut en bas). Production personnelle

Le 4^{ème} mode, qui visuellement ressemble à un soulèvement de la toile, a une masse effective selon l'axe vertical de 52%, et la fréquence qui correspond varie entre environ 4 Hz et 6 Hz selon les configurations. Plus généralement, on observe pour les fréquences propres des variations allant du simple au double, voire du simple au triple, selon les différents cas de charge. En revanche, on obtient globalement des premiers modes de vibration propre entre environ 2 Hz et 7,5 Hz, or ce sont des valeurs que l'on retrouvait sur le spectre de Fourier tiré des mesures sur la Maison en Terre (plus petits pics en dessous du pic à 9 Hz). On peut donc supposer que, lors des mesures sur le toit de la maison, on a « détecté » avec le capteur certaines fréquences de vibration de la toile, avec possiblement un peu de vent.

3.4 Interprétation et limites des résultats

Lors de la modélisation en éléments finis de la Maison en Terre, j'ai rencontré quelques difficultés, notamment à cause du fait que peu de données sont aujourd'hui disponibles sur la maison. Le matériau utilisé, le mode de compactage des briques et bien d'autres informations m'étaient inconnus, et il a fallu se référer à la littérature pour estimer ces paramètres. Malgré tout, à la fin de cette étude, on peut tout de même faire les suppositions suivantes :

- Le pic de résonance autour de 9 Hz observé sur les spectres de Fourier semblerait correspondre en fait à un 'double mode' selon les deux axes horizontaux. D'après la masse modale effective de ceux-ci, on peut penser qu'ils contribuent à la majorité du comportement dynamique vibratoire de la maison.
- Si l'on souhaite de caler le modèle numérique sur les mesures expérimentales effectuées, et en particulier sur ce même pic de fréquence à 9 Hz, cela voudrait dire que le module de Young du matériau constituant la maison à l'heure actuelle serait plutôt autour des 600 MPa, voire moins,

que des 2000 MPa , valeur prise initialement selon la littérature. Cela paraît probable étant donné que les méthodes de compactage n'étaient à l'époque pas les mêmes qu'aujourd'hui, et que la maison a maintenant plus de 30 ans de vie. Elle a notamment vécu deux ans sans la toile de protection, et a donc été sujette aux intempéries, ce qui a pu causer des dégradations du matériau.

- Une partie des différents pics observés entre $2,5 \text{ Hz}$ et 8 Hz sur les spectres de Fourier seraient plutôt liés aux vibrations propres du site et de la toile au dessus de la maison.

Par ailleurs, la gamme de fréquences des ondes sismique se situe entre $0,3 \text{ Hz}$ et 30 Hz ²⁴, et on a vu précédemment que la cuvette grenobloise produisait des phénomènes de résonance, avec une amplification des vibrations entre $0,25 \text{ Hz}$ et 10 Hz . Le capteur utilisé pour les essais expérimentaux ne permettait pas de mesurer les basses fréquences en dessous de 1 Hz , mais les calculs numériques ont montré que la maison n'avait à priori pas de fréquence propre dans cette gamme, ce qui est plutôt rassurant étant donné que la fréquence de résonance au niveau de campus est de $0,29 \text{ Hz}$. En revanche, nous avons vu que les pics de fréquences les plus importants se situaient entre 3 Hz et 8 Hz , avec un pic majeur à 9 Hz , et il y a donc un risque d'amplification des vibrations. Même si la maison est relativement petite et basse, une étude plus poussées du comportement dynamique de la Maison en Terre sous séisme pourrait donc s'avérer utile.

De plus, parmi les pics autour de 3 Hz , il y a probablement une fréquence qui correspond à la vibration du sol à l'échelle de la ville, même si ce pic n'apparaissait pas distinctement sur les courbes au sol. En effet c'est une valeur que l'on a retrouvée sur la quasi totalité des mesures réalisées, à la Maison en Terre, mais aussi au laboratoire. Dans leur ouvrage de 2002, ZHANG et al. expliquent que c'est une valeur fréquemment observée sur les mesures et qu'en plus de la fréquence de résonance fondamentale à environ $0,3 \text{ Hz}$, c'est une fréquence que l'on peut assigner à une fine couche superficielle du sol dans le bassin grenoblois. Cela ajoute donc de la difficulté et des incertitudes dans l'interprétation de cet ensemble de pics entre 2 Hz et 8 Hz .

Concernant la modélisation numérique réalisée, des incertitudes persistent. En effet, au sujet de la toile, nous ne disposons d'encore moins de documentation que pour la maison. Seul le DCE de 1988, avec un schéma d'architecture, nous donnait des indications sur sa géométrie et les exigences pour le choix du produit. Les calculs de descente de charges qui auraient pu fournir de précieuses informations n'ont pas été retrouvés par le laboratoire CRATerre. Il a donc fallu émettre un certain nombre d'hypothèses pour pouvoir la modéliser et évaluer son influence sur la maison.

Par ailleurs, dans la modélisation de la maison, on ne prend pas en compte les joints en mortier entre les briques, et la disposition particulière de celles-ci. Avec Dominique DAUDON, nous avons fait le choix d'homogénéiser le matériau, avec comme paramètres ceux correspondant à des briques de terre comprimée, mais nous aurions pu procéder autrement. Par exemple, aux Etats-Unis, l'Uniform Building

²⁴ Source : cours de Génie Parasismique de Stéphane HANS à l'ENTPE

Code (UBC-1991) recommande d'approcher le comportement des briques de terre et du mortier par celui d'un matériau homogène équivalent (BAKHTERI et al., 2004.). Les propriétés matérielles équivalentes peuvent être déterminées par une méthode expérimentale, mais nécessitent un ensemble d'expériences étendues et coûteuses. Il est alors possible plus simplement d'utiliser un module d'Young équivalent, qui dérive des propriétés élastiques de la brique et du mortier, et qui dépend de l'épaisseur relative :

$$E_m = \frac{(1 + \gamma_t)}{\left(1 + \frac{\gamma_t}{\gamma_m}\right)} E_b$$

$$\lambda_t = \text{Thickness ratio} = \frac{t_j}{t_b}$$

$$\lambda_m = \text{Modulus ratio} = \frac{E_j}{E_b}$$

t_j = Thickness of mortar joints
 t_b = Thickness of brick
 E_j = Modulus of elasticity of mortar joints, assumed to be 20000 N/mm² [8]
 E_b = Modulus of elasticity of bricks, assumed to be 37000 N/mm² [8].

En revanche, cela implique d'avoir des informations non seulement sur les briques, mais également sur le mortier utilisé, ce qui n'est pas le cas pour la Maison en Terre.

De plus, j'ai réalisé la géométrie principalement en me basant sur le plan masse et sur deux coupes de la maison, et quelques différences ont donc probablement été introduites dans le modèle. Les menuiseries et des petits dômes en plastiques présents sur le toit n'ont pas été pris en compte. Ces petites dissemblances ont peut-être joué sur la valeur des fréquences propres obtenues, mais très probablement de manière peu significative. Le facteur d'incertitude majeur reste la définition du matériau à l'heure actuelle. Une solution pour mieux connaître ses caractéristiques pourrait être de réaliser des mesures de bruit de fond sismique de manière régulière (tous les cinq ans) ou après des événements qui pourraient causer des dégradations. Cela permettrait de suivre l'évolution des fréquences propres de la maison, et d'estimer les éventuels endommagements.

Enfin, un enregistrement au sommet d'une structure reflète le comportement dynamique du système complet composé du sol et de la structure, et non pas celui de la structure seule, et il peut donc être différent selon les conditions de sol (DUNAND, 2005). Dans sa thèse, Philippe GUEGUEN montre que le mouvement du sol est sensiblement perturbé à proximité immédiate d'un bâtiment. Il explique également que « le mouvement du sol en milieu urbain est diminué, particulièrement pour des ensembles homogènes de bâtiments, mais des amplifications significatives peuvent se produire localement et de manière imprévisible » Les interactions entre la structure, le sol et plus globalement la ville sont donc importantes dans l'estimation de la vulnérabilité d'un bâtiment, mais elles restent difficiles à appréhender et à mesurer. Cependant, les mesures *in situ*, comme les mesures par bruit de fond sismique, permettent de se faire une idée plus juste du comportement réel de la structure auscultée.

Conclusion

Nous avons donc vu dans cette étude l'intérêt que peut avoir le bruit de fond sismique dans l'étude de vulnérabilité du bâti. Comme le relèvent bon nombre d'auteurs dans la littérature (BONNEFOY-CLAUDET, CADET, DUNAND, GUEGUEN, HANS, etc.), la méthode de mesure par bruit de fond est simple et peu coûteuse, car elle ne nécessite que peu de matériel et d'effort de calcul. Avec de très faibles amplitudes, cette technique d'endommagement pas les structures et permet de réaliser des expérimentations même si des usagers occupent les locaux. De plus, pour certains bâtiments relativement élancés, un seul capteur en tête de la structure peut suffire à donner un grand nombre d'informations, et notamment les fréquences propres de vibration. Comme le remarque Stéphane HANS, de par ses nombreux avantages, ce dispositif pourrait être mis en place pour les bâtiments prioritaires tels que les établissements de santé, d'enseignement ou encore de gestion de crise.

Avant de réaliser les mesures expérimentales et numériques, nous avons tenté d'évaluer une approximation de la fréquence propre de la Maison en Terre à l'aide de différentes techniques. Ces dernières nous ont donné un ordre de grandeur tout à fait correct, mais la modélisation par éléments finis nous a permis de visualiser l'allure des déformées modales, et de nous rendre compte de l'importance du module de Young, et donc de l'état du matériau, sur le comportement dynamique d'une structure.

Par ailleurs, nous avons vu que la particularité topographique et géologique de l'agglomération de Grenoble en fait un site relativement sismique. On a notamment relevé que l'effet de site produit par la cuvette sédimentaire engendrait des amplifications de l'ordre de dix des vibrations entre **0,25 Hz** et **10 Hz**. Les fréquences propres de la maison que l'on a mesurées se trouvent dans cette gamme, et l'on se demande alors si une étude plus poussée de sa vulnérabilité serait nécessaire. Pour avoir une modélisation numérique plus juste, nous pourrions par exemple estimer le module d'élasticité des briques de terre comprimées qui la constituent à l'aide de méthodes non destructives. Dans leurs travaux de 2015, Karima GADRI et Abdelhamid GUETTALA s'intéressent à déterminer les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité) d'un béton âgé, par les essais non destructifs en utilisant le scléromètre et l'ultrason. Des méthodes similaires pourraient être applicables à la terre crue, mais celles-ci sont relativement coûteuses, et la catégorie d'importance du bâtiment doit pouvoir justifier ces démarches.

+ Fin pédagogiques du projet

Références bibliographiques

- AMMARI A., BOUASSRIA K., et al., 2016. *Promotion de la technique du bloc de terre comprimée dans le secteur de la construction par l'amélioration de son comportement mécanique*. Journal of Materials and Environmental Science (JMES), Volume 7 N10. Pages 3532-3537.
- BAKHTERI J., MAKHTAR A.M., SAMBASIVAM S., 2004. *Finite element modelling of structural clay brick masonry subjected to axial compression*. Universiti Teknologi Malaysia. Jurnal Teknologi B (41B), pages 57-68.
- BARD P.-Y., 2002. *Les effets de site de la cuvette grenobloise*. Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique (Observatoire de Grenoble) et Laboratoire Central des Ponts-et-Chaussées. Risques Infos n°13, 6 pages.
- BLONDET M., VILLA GARCIA G., BRZEV S., 2003. *Construcciones de adobe resistentes a los terremotos : Tutor*. Enciclopedia Mundial de Vivienda del EERI (Earthquake Engineering Research Institute) / IAEE (International Association for Energy Economics). 25 pages.
- BLONDET M., VILLA GARCIA G., 2011. *Adobe Construction*. Catholic University of Peru.
- BONNEFOY-CLAUDET S., 2004. *Nature du bruit de fond sismique : implications pour les études des effets de site*. Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement. Grenoble : Université Joseph-Fourier. 241 pages.
- BOURDIER Q., PLAN E., SOYEUX T., DEVUN J., 2016. *Rapport d'étude de "La maison en terre du campus"*. Projet pluridisciplinaire. Grenoble : Université Grenoble Alpes. 38 pages.
- BRIDGENS B., BIRCHALL M., 2012. *Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures*. Engineering Structures, Volume 44, pages 1-12.
- BRUNO A.W., GALLIPOLI D., PERLOT-BASCOULES C., MENDES J., SALMON N., 2015. *Briques de terre crue : procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques*. Rencontres Universitaires de Génie Civil. Université de Pau et des Pays de l'Adour : laboratoire SIAME. 10 pages.
- CADET H., 2007. *Utilisation combinée des méthodes basées sur le bruit de fond dans le cadre du microzonage sismique*. Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement. Grenoble : Université Joseph-Fourier. 299 pages.
- CAPORAL A., 1987. *Le retour à la terre : une maison en 24 heures*. Pages 76-79.
- CHAMPIRE F., 2017. *Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction*. Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique. École Nationale des Travaux Publics d'État. 189 pages.
- COSTA C., CERQUEIRA A., ROCHA F., VELOSA A., 2018. *The sustainability of adobe construction: past to future*. International Journal of Architectural Heritage, 10 pages.
- DESCHAMPS A., HEQUET T., GARDINER R., BAUDY B., 2016. *Étude structurelle et thermique du module terre du campus*. Projet de fin d'études en DUT GCCD. Grenoble : IUT 1. 81 pages.

- DINH T.D., REZAEI A., et al., 2014. *A new elasto-plastic material model for coated fabric*. Engineering Structures, Volume 71, pages 222-233.
- DINH T.D, REZAEI A., et al., 2015. *A shape optimization approach to integrated design and nonlinear analysis of tensioned fabric membrane structures with boundary cables*. International Journal of Solids and Structures, Volume 83, pages 114-125.
- DOAT P., HAYS A., HOUBEN H., MATUK S., VITOUX F., 1979 (?). *Construire en Terre*. AnArchitecture, par CRATerre. 272 pages.
- DUNAND F., 2005. *Pertinence du bruit de fond sismique pour la caractérisation dynamique et l'aide au diagnostic sismique des structures de génie civil*. Géophysique. Grenoble : Université Joseph-Fourier. 377 pages.
- DUNAND F., GUEGUEN P., 2010. *Analyse du risque sismique de Grenoble : le cas d'une ville exposée à un aléa modéré*. Pôle Grenoblois d'étude et de recherche pour la prévention des Risques Naturels, 41 pages.
- GADRI K., GUETTALA A., 2015. *Évaluation du module d'élasticité à la compression à l'aide des techniques non destructives*. Lyon : 22ème Congrès Français de Mécanique. 6 pages.
- GIOVANNI G., SEDILI I., 2012. *La construction parasismique appliquée à la terre crue - Analyse et améliorations des techniques de construction en terre crue*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit (ENAC). 37 pages.
- GUEGUEN P., 2000. *Interaction sismique entre le sol et le bâti : de l'interaction sol-structure à l'interaction site-ville*. Géophysique, Géochimie, Géomécanique. Grenoble : Université Joseph Fourier. 184 pages.
- GUEGUEN P., 2009. *Sismologie Urbaine : Aléa local, dynamique des structures, interaction site-ville et vulnérabilité urbaine*. Géophysique. Grenoble : Université Joseph Fourier. 179 pages.
- HANS S., 2002. *Auscultation dynamique de bâtiments et modélisation par homogénéisation : contribution à l'analyse de la vulnérabilité sismique*. Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique. Lyon : Institut National des Sciences Appliquées. 254 pages.
- HOUBEN H., RIGASSI V., GARNIER P., 1996. *Blocs de terre comprimée : équipements de production*. Guides du Centre pour le Développement Industriel (CDI), Coédition du CDI et du CRATerre-EAG, 155 pages.
- HUREZ M., JURASZEK N., PELCE M., 2009. *Dimensionner les ouvrages en maçonnerie*. Guide d'application. Paris : Edition Eyrolles. 312 pages.
- LEBRUN B., 1997. *Les effets de site : étude expérimentale et simulation de trois configurations*. Géophysique. Grenoble : Université Joseph Fourier. 208 pages.
- LEBRUN B., HATZFELD D., BARD P.-Y., 2001. *Site Effect Study in Urban Area: Experimental Results in Grenoble (France)*. Pure and Applied Geophysics, 15 pages.
- MICHEL C., 2007. *Vulnérabilité sismique de l'échelle du bâtiment à celle de la ville - Apport des techniques expérimentales in situ - Application à Grenoble*. Géophysique. Grenoble : Université Joseph Fourier. 212 pages.

MICHEL C., GUEGUEN P., BARD P.-Y., 2007. *Comparaison entre calculs de vulnérabilité sismique et propriétés dynamiques mesurées*. 7ème Colloque National AFPS 2007. Ecole Centrale Paris. 10 pages.

MORIN Y., 1987. *Pari gagné à Grenoble : Une maison en terre construite en 24 heures*. Les affiches de Grenoble et du Dauphiné, Architecture, page 76.

PERRAULT M., 2013. *Évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments à partir de mesures in situ*. Sciences de la Terre et de l'Environnement. Université de Grenoble. 222 pages.

PIAZZOLLA S., QUAY-THEVENON R., VOLLE B., VYARAVANH-GIRARD A., 2017. *Etude de réhabilitation de la Maison en terre*. Projet pluridisciplinaire. Grenoble : Université Grenoble Alpes. 40 pages.

ZHANG L., FARVACQUE L., LESOURD M., PLOUVIEZ E., 2002. *Electron beam stabilization experiences at the ESRF*. 7 pages.

Annexes

Annexe A : Liste des personnes concernées par le projet e-CoLoS !

Nom de l'établissement d'enseignement supérieur	Composante	Personnes impliquées dans projet
UGA	PHITEM- Génie Civil	Dominique DAUDON (porteuse, ex resp du Master2 GC, outils numériques pour le GC, conception collaborative, acoustique ...) Jean-Martial COHARD (énergétique) Yannick SIEFFERT (conception collaborative, construction Terre, ex responsable M2GC) Thomas JAY-ALLEMAND (PAST, architecte, construction Terre) Emmanuel GODDE (Prag, resp L3 GC, maçonnerie) Philippe GUEGUEN (DR LCPC auscultation des ouvrages) Gilles DEBIZET (management environnemental, co porteur eco-SESA CDP)
	IUT GCDD	Florence JOUSSELLIN (co-porteuse, salle BBC) Laurent OXARANGO (salle BBC), Gérald HIVIN (prag modélisation structure) Magali AUPICON (prag construction terre, réseau Tera, AsTerre)
	DAPAL	Mr BIGUENET données patrimoniales, Frédéric BATTOIS, Olivier BERARD
	CAESUG	Gilles ESCALA (président) , Nadège MASNADA (gestionnaire)
ENSAG	Labex AE&CC, Laboratoire CRAterre, Master AE&CC, DSA Terre, Chaire UNESCO	Thierry JOFFROY (DSA et AE&CC) Bakonirina RAKOTOMAMONY (DSA, Chaire UNESCO) Philippe GARNIER (Responsable Habitat pour AE&CC)
INRIA/Amiqua4home	Equipex	Stan BORKOWSKI (Inria) Nicolas BONNEFOND (Inria) Rémi PINCENT (Inria)
AMACO	IDEFI	Laetitia FONTAINE Martin POINTET
ENEPS	IDEFI	Pierre BILLET Directeur
Politecnico Milano-Campus de LECCO		Graziano SALVALAI (MCF thermicien) Gabriele MASERA (resp Master) , Marco IMPERADORI (inge-archi, RI-Polimi) Giovanni DOTELLI (MCF cycle de vie), Francesco CALVETTI (MCF méca, sports)

Annexe B : Programme du colloque Terra Education III

JOUR
DAY

Lundi | Monday

1 04.06

8.30 | 12.30 ▶
Amphi Nord, Bâtiment A,
UFR PhiTEM, Université
Grenoble Alpes

8.30 | 9.00 ▶
Accueil des participants et mise en place des posters
Reception of participants and poster setting

9.00 | 09.45 ▶
Introduction et discours d'ouverture | Introduction and opening speeches

THEME
PEDAGOGIES INNOVANTES | INNOVATIVE PEDAGOGIES

MODÉRATEUR | MODERATOR :
CAMILLA MILETO, Universitat Politècnica de València, Spain

09.45 | 09.50 ▶
Introduction du thème par le modérateur | Theme introduction by the moderator

09.50 | 10.05 ▶ **Integration of Research, Practice and Education in Teaching Earth Architecture in China**
JUN MU ; WEI JIANG ; TIEGANG ZHOU ; ZENGFEI LIANG ; ZHONGQI REN

10.05 | 10.20 ▶ **Transmission de la méthode VerSus "from Vernacular to Sustainable" aux étudiants et enseignants d'architecture : retour d'expérience**
NURIA SANCHEZ MUÑOZ ; SEBASTIEN MORISET ; SAVERIO MECCA ; LETIZIA DIPASQUALE ; MADDALENA ACHENZA ; CAMILLA MILETO ; FERNANDO VEGAS LOPEZ-MANZANARES ; MARIANA CORREIA ; GILBERTO CARLOS

10.20 | 10.35 ▶ **Shifting the Possible: Training Outcomes for Earth Structures**
ROWLAND KEABLE & MARIA BROWN

10.35 | 11.05 ▶ **Pause café | Coffee break**
Librairie | bookshop

11.05 | 11.20 ▶ **Amàco, l'atelier matières à construire – Bilan 2012-2018**
MARION BISIAUX ; LAETITIA FONTAINE ; ROMAIN ANGER

11.20 | 11.35 ▶ **ElémenTerre, ouvrir les possibles sur la matière**
NATHALIE SABATIER & ALBA RIVERO OLMOS

11.35 | 11.50 ▶ **Training for the seismic retrofitting of earthen buildings in Peru**
BENJAMIN MARCUS ; CLAUDIA CANCINO ; JUAN CARLOS MENEZES ; JUAN CARLOS MELLADO ; PAULO B. LOURENÇO DANIEL TORREALVA ; FEDERICA GRECO ; RAFAEL AGUILAR

11.50 | 12.05 ▶ **Learning from seismic structural behavior of traditional adobe dwellings**
FRANCISCO JAVIER SORIA LOPEZ & LUIS FERNANDO GUERRERO BACA

12.05 | 12.30 ▶ **Discussion**

12.30 | 14.00 ▶ **Pause déjeuner | Lunch break**
Librairie | bookshop 12.30 | 13.00

JOUR
DAY

Lundi | Monday

1 04.06

14.00 | 17.30 ▶
Amphi Nord, Bâtiment A,
UFR PhiTEM, Université
Grenoble Alpes

THEME
INITIATIVES PUBLIQUES, SENSIBILISATION & EDUCATION INFORMELLE | PUBLIC INITIATIVES, SENSITIZATION & INFORMAL EDUCATION

MODÉRATEUR | MODERATOR :
CLAUDIA CANCINO, The Getty Conservation Institute, USA

14.00 | 14.05 ▶
Introduction du thème par le modérateur | Theme introduction by the moderator

14.05 | 14.20 ▶ **Conservation Machaqa: un nouveau sens pour la conservation du patrimoine**
ANDRÉ ANINAT & CRISTIAN HEINSEN

14.20 | 14.35 ▶ **Introduction of the Earthen Architecture Association and general activities in the field of education and research of earthen structures in the Czech Republic**
ZDENĚK VEJPUSTEK ; IVANA ŽABIČKOVÁ ; JAN RŮŽIČKA

14.35 | 14.50 ▶ **Diffuser les connaissances de construction en banco durable**
PROSPER ZOMBRE ; ALEXANDER JACOBY ; MARIA CALZADILLA

14.50 | 15.05 ▶ **Discussion**

15.05 | 15.35 ▶ **Pause | Break**
Librairie | bookshop

15.35 | 15.50 ▶ **Integral technical training for women in northern Nicaragua.**
AMANDA CENTENO ; HELEN SHEARS ; FATIMA MEDINA
Présenté par / Presented by
ANDREEA DANI

15.50 | 16.05 ▶ **Chile : education and earthquakes. Knowledge transfer as a response to the seismic condition**
AMANDA RIVERA VIDAL

JOUR
DAY

Mardi | Tuesday

2 05.06

9.00 | 12.30 ▶
Amphi Nord, Bâtiment A,
UFR PhiTEM, Université
Grenoble Alpes

16.05 | 16.20 ▶ A Citizen Science Approach to build a knowledgebase on earth constructions in the Weinviertel region, Austria
THOMAS SCHAUPPENLEHNER ;
RENATE EDER ; KIM RESSAR ;
HUBERT FEIGLSTORFER ;
ROLAND MEINGAST ; FRANZ
OTTNER

16.20 | 16.35 ▶ L'enseignement de l'architecture en terre dans l'Université Nationale de Tucumán en Argentine. Education formelle et non formelle
MIRTA EUFEMIA SOSA & STELLA
MARIS LATINA

16.35 | 17.00 ▶ Discussion

**17.00 | 17.30 ▶
Clôture | Closure**

Activité annexe | Side activity

18.30 ▶ 21.00

Visite du prototype Terra Nostra, immeuble d'habitation en bois et terre crue | Départ collectif en tram depuis le colloque (25 min.)

Visit of the Terra Nostra Prototype, apartment building made of timber & raw earth | Collective departure by tram from the colloquium site (25 min.)

Adresse | Address:

La Bifurk, 2 rue Gustave Flaubert,
Grenoble.

THEME
PROGRAMMES FORMELS &
CERTIFICATION | FORMAL
PROGRAMMES & CERTIFICATION

MODÉRATEUR | MODERATOR :
LUC VAN NIEUWENHUYZE,
Asterre, France

**09.00 | 09.05 ▶
Introduction du thème par le
modérateur | Theme introduction
by the moderator**

09.05 | 09.20 ▶ Education, awareness and dissemination. The activities carried out within the framework of the UNESCO Chair 'Earthen architecture, constructive cultures and sustainable development' at UPV (Spain)
CAMILLA MILETO & LIDIA GARCIA-SORIANO

09.20 | 09.35 ▶ Amélioration & appropriation d'une technique d'architecture de Terre comme modèle de transmission des connaissances à travers de multiples sphères d'action, depuis l'université, la pratique professionnelle, le master et jusqu'à son insertion dans la communauté. Cas Université ITESO à Guadalajara, Mexique
ANTONIO PENAGOS ARENAS

09.35 | 09.50 ▶ Continuité du Programme d'Architecture de Terre de l'Université Nationale de Colombie : un défi pour le troisième cycle
JENNY VARGAS

09.50 | 10.05 ▶ Grounded Materials ou de la matière ancrée : Retour sur une expérience pédagogique zurichoise
ALICE HERTZOG ; SASHA CISAR ;
CORALIE BRUMAUD ; MARIETTE
MOEVUS ; ANOUCHKA KACZMAREK
; GUILLAUME HABERT

10.05 | 10.20 ▶ The challenges of higher education on earth building we face today
BRITTA WOLFF & STEPHAN
JÖRCHEL

10.20 | 10.35 ▶ Discussion

**10.35 | 11.05 ▶ Pause café |
Coffee break**
Librairie | bookshop

11.05 | 11.20 ▶ La formation de chef de chantier pour consolider le cycle de construction
MAURICIO GANDUGLIA

11.20 | 11.35 ▶ ACVET, construire en terre au Congo
ALEXANDRE DOULINE & FAUSTIN
MOMA KONGOLO

11.35 | 11.50 ▶ Teaching of Earth Construction as a Technical Vocation in a Nigerian Polytechnic
THEOPHILUS SHITTU & MICHAEL
AJUFOH

11.50 | 12.05 ▶ L'architecture de terre dans le Pré-Rif marocain
ABDERRAFI LAHBABI

12.05 | 12.30 ▶ Discussion

**12.30 | 14.00 ▶ Pause déjeuner |
Lunch break**
Librairie | bookshop 12.30 | 13.00

JOUR
DAY

Mardi | Tuesday

2 05.06

14.00 | 17.30 ▶

Amphi Nord, Bâtiment A,
UFR PhiTEM, Université
Grenoble Alpes

THEME

RENFORCEMENT DES
INSTITUTIONS, DES
COMMUNAUTÉS & DES RESEAUX
| REINFORCEMENT OF
INSTITUTIONS, COMMUNITIES &
NETWORKS

MODÉRATEUR | MODERATOR :
DAVID GANDREAU, Ecole
Nationale Supérieure d'Architecture
de Grenoble, France

14.00 | 14.05 ▶

**Introduction du thème par le
modérateur | Theme introduction
by the moderator**

14.05 | 14.20 ▶ **L'institut des villes
de Sao Paolo : quand le
mouvement social et l'université
se rencontrent**

TIARAJU PABLO D'ANDREA
& PEDRO FIORI ARANTES

14.20 | 14.35 ▶ **Rooted
Sustainability of Yazd Earthen
Architecture : Challenges of the
Present and Future**

SEYED MOHAMMAD HOSSEIN
AYATOLLAHI ; FATEMEH
MALEKZADEH ; ARMAN
SEDIGHIAN ; MEHDI GHASEMI ;
AMIR SAEED PAKSERESHT

14.35 | 14.50 ▶ **Dynamiques
universitaires et stratégies autour
des patrimoines en terre en
Arménie et France**

SUZANNE MONNOT & EMMA
HARUTYUNYAN

14.50 | 15.05 ▶ **Des actions
croissantes en faveur de la
construction en terre à l'Ensa de
Toulouse**

ISABELLE VERVICH-FORTUNÉ

15.05 | 15.20 ▶ **Discussion**

15.20 | 15.50 ▶ **Pause | Break**
Librairie | bookshop

15.50 | 16.05 ▶ **The university
work of the World Heritage City
Project, intervention models for
the rescue and preventive
conservation of earth-based
architecture**

SEBASTIÁN ASTUDILLO CORDERO ;
MARÍA CECILIA ACHIG-BALAREZO ;
GABRIELA BARSALLO CHAVEZ ;
FAUSTO CARDOSO MARTINEZ

3 |

16.05 | 16.20 ▶ **Earth and loof ah
shells. An educational
experimentation**
MADDALENA ACHENZA

16.20 | 16.35 ▶ **Enseigner la
construction soutenable en terre à
l'UGA. "projet IDEX Formation :
e-CoLoS !"**

DOMINIQUE DAUDON ; FLORENCE
JOUSSELLIN ; JEAN-MARTIAL
COHARD ; YANNICK SIEFFERT ;
LAURENT OXARANGO ; THIERRY
JOFFROY ; BAKONIRINA
RAKOTOMAMONY ; PHILIPPE
GARNIER ; STAN BORKOWSKI ;
NICOLAS BONNEFOND ; REMI
PINCENT ; PIERRE BILLET ;
EMMANUEL GODDE ; PHILIPPE
GUEGUEN ; GILLES DEBIZET ;
THOMAS JAY-ALLEMAND ; GERALD
HIVIN ; MAGALI AUPICON ; MARCO
IMPERADORI ; GRAZIANO
SALVALAI ; GABRIELE MASERA,
GIOVANNI DOTELLI ; FRANCESCO
CALVETTI ; LAETITIA FONTAINE,
MARTIN POINTET ; PHILIPPE
BIGUENET ; FREDERIC BATTOIS ;
OLIVIER BERARD ; GILLES
ESCALA ; NADEGE MASNADA

16.35 | 17.00 ▶ **Discussion**

17.00 | 17.30 ▶

**Discours de clôture | Closing
speeches**

Activité annexe | Side activity

18.00 ▶ 19.30

Anniversaire de la maison 24h &
Lancement du projet e-CoLoS! |
Départ collectif à pied depuis le
colloque (10 min.)
Visit of the 24h House & e-CoLoS!
Project Launch | Collective departure
by foot from the seminar site (10 min.)

Adresse | Address:
Campus Universitaire, 588-652
Avenue Centrale, 38400 Saint-Martin-
d'Hères



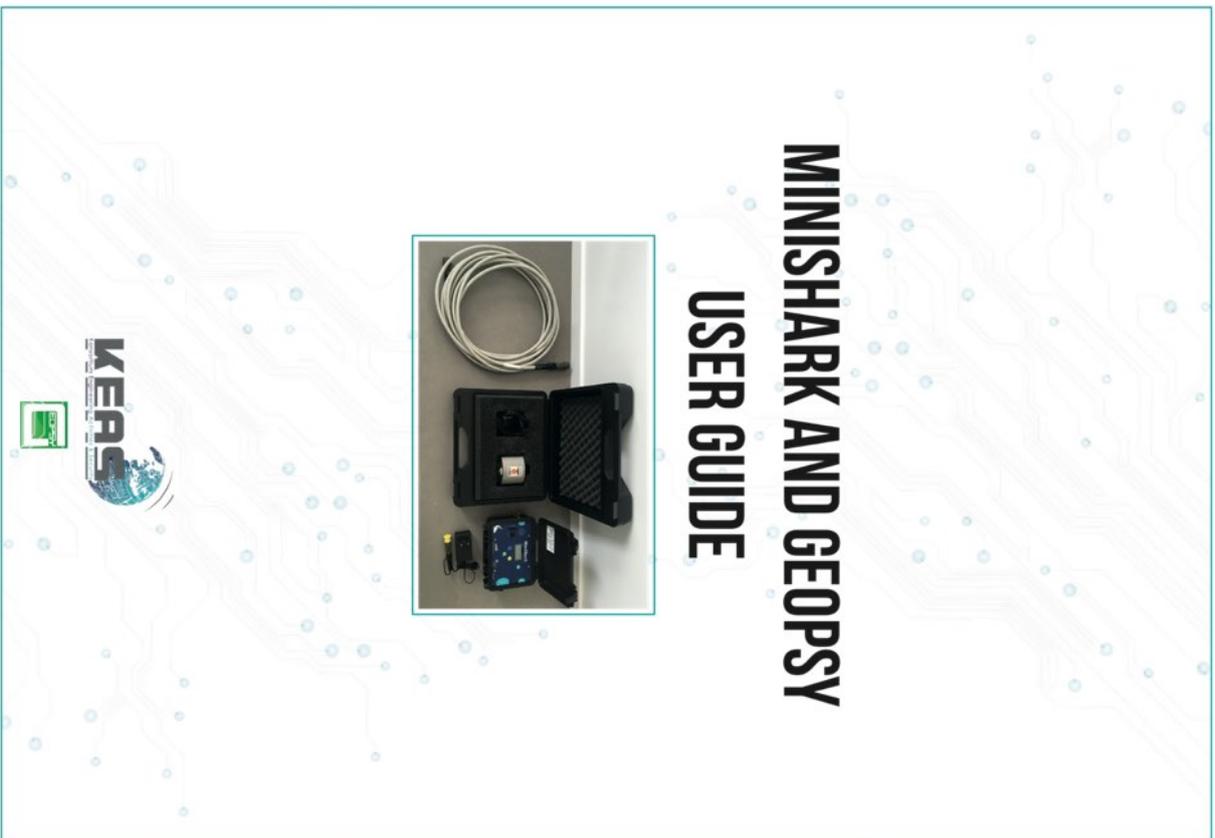
organisé dans le cadre des activités de la Chaire
UNESCO, architecture de terre, et du programme
WHEAP de l'UNESCO | organized in the framework of
the activities of the UNESCO Chair, earthen architecture,
and the UNESCO's WHEAP program

Annexe C : Données pour le calcul des spectres élastiques

Données et hypothèses	Commentaire	Valeur	Unité
Zone de sismicité	Saint-Martin-d'Hères est situé en zone de sismicité moyenne	4	
Accélération maximale du rocher pour la zone sismique A_{gR}	Déduit de la zone de sismicité	1,6	m.s ⁻²
Catégorie d'importance du bâtiment	Etablissement recevant du public des 4e et 5e catégories (donc jusqu'à 300 personnes)	II	
Coefficient d'importance du bâtiment γ_I	Déduit de la catégorie d'importance	1	
Amortissement ζ	Hypothèse : amortissement standard	5-10	%
Terme multiplicatif η	$\eta = \text{Max}(0,55 ; (10/(5+\zeta))^{1/2})$	1	
Coefficient d'amplification topographique τ	Terrain plat → $\tau=1$, mais cela veut dire que l'on ne prend pas en compte les effets de site de la cuvette grenobloise?	1	
Type de séismes	On considère que les séismes de magnitude inférieure à 5.5 constituent le facteur prépondérant de risque	2	
Type de sol	On considère que le sol est constitué de dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres	C	
S	Déduts du type de sol et du type de séismes	1,5	
T_B		0,1	s
T_C		0,25	s
T_D		1,2	s



Classification grossière des zones de Grenoble selon la classification EC8 (orange : type C, vert : type B). Source : « Analyse du risque sismique de Grenoble : le cas d'une ville exposée à un aléa modéré », F. DUNAND et P. GUEGUEN, 2009



CAUTION !
 The Minishark station only works with the SD card plugged.
 Stop the Minishark station before removing the SD card.
 Do not leave the station connected to the mains when using it. Change it before use.

1. SENSOR INSTALLATION

The arrow on the top of the sensor must be oriented North in the case of a study on the ground. If the study concerns a structure, it must be oriented towards one of its principal directions. Be careful, however, not to leave a compass nearby when measuring.

The sensor must be laid flat. Check with the spirit level and adjust with the screws of the sensor feet.



To connect the cable to the sensor and to the station, screw until you hear a «click».

At the end of the manipulation, the sensor must be stored and transported with the label with the orange circle facing up (see picture).



2. MINISHARK PARAMETER SETTINGS

Entering parameter settings: press **yellow** and **blue** simultaneously.

Move to next parameter: press **yellow**.

Change parameter value: press **blue**. For fast value run, keep **blue** pressed.



FIRST PARAMETER SETTING SCREEN
DO NOT CHANGE ANY SETTINGS

- Clock Set: Manually set date and time. Usually used when GPS not available
 - GPS pwr: turns GPS reception On or Off.
 - GPS updt: turns GPS date and time update on (yes) or off (no).
- To validate parameters, press **OK**.



SECOND PARAMETER SETTING SCREEN
ONLY CHANGE:
 GPS ant.: External (antenna outside the building) or Internal
 Trans factor: 400

- GPS ant.: GPS antenna used (Internal or External).
 - Trans Factor: sensor conversion factor (V/m/s). Set to 1 if unknown.
 - Batt Low Level: read only parameter. Lowest allowed internal battery voltage. Alarms rings when reached.
 - Batt voltage: read only parameter. Current battery voltage. Below 13.3V, internal battery may irreversibly fail.
- To validate parameters, press **OK**.

```
Gain= 1 Ovrnx= 10%
Iqth=3min Single
Sample Rate = 200Hz
Bootloader Start: N
```

THIRD PARAMETER SETTING SCREEN

ONLY CHANGE (IF NECESSARY) :
Iqth: duration of measurement
Gain: amplification (can be modified before recording)

- Gain: amplification factor
 - Ovrnx: maximum allowed overflow sample rate.
 - Iqth: recording duration (1 to 60 minutes).
 - Continuous or Single recording mode.
 - Sample Rate: sample rate acquisition.
 - Bootloader start: set to y only to update internal firmware, when linked to a PC via USB cable. When the parameter is set to x, the bootloader mode starts immediately.
- To validate parameters, press **OK**.

→ Only gain can be modified before recording without entering the setting parameter process
 → When Ovrnx is reached, a beep rings but recording does not automatically stop. It is up to the user to decide to stop or not the current recording.

3. MINISHARK MAIN SCREEN

Increase of decrease gain by pressing **▲** or **▼**. Other parameters are read only.

```
Gain=1.6384 OVF= 0.0%
Nxt=0021_171120_0638
Iqth=3min Single
Ampl1 : █
```

MAIN SCREEN
 Change the gain so that there is no saturation

- Gain: current gain(1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16382). - OVF = overflowed sample rate of preceding recording
- Nxt: name of next file (station#,_yymmdd_Thmm). Automatically updated with time.
- Iqth: current recording duration.
- Continuous or Single current recording mode.
- Ampl1: signal level, indicated by moving black squares.

4. MINISHARK RECORDING

Start recording by pressing **OK**.
 The corresponding light flicks during recording phase.
 End of recording is indicated by three series of three beeps. By clicking on **OK**, you relaunch a measure.
 Following information sequentially appears on screen:

```
*****
* NOW RECORDING *
* AT 200 Hertz *
*****
```

```
Gain=8192 OVF= 0.0%
0021_171120_0638
Remaining Time: 39s
Ampl1 : █
```

```
END OF ACQUISITION
Elapsed time: 32:00
Data saved on file :
0021_171120_0638
```

→ A beep rings when OVF ≥ Ovrnx
 → Stop recording during data acquisition: push **OK** during at least 5 seconds. Current data file can then be saved or deleted (Only when elapsed time of current recording is over one minute).

5. MISCELLANEOUS

Station reset: press **▲** and **OK** simultaneously during at least 5 seconds. Use only when station is frozen or if Bootloader Start has been mistakenly set to y.
 Turn screen light on during recording: briefly press On/Off button.
 Turn station off: press On/Off button for 3 seconds.
 GPS update: when not recording the = following Nxt repeatedly alternates with a *.
 Recording indication: the : after Remaining Time or Rt blinks.

6. DATA ANALYSIS

The created data file is a .txt file, with a header recalling all the parameters.

The file then contains the data in Volt in the form of 3 columns, with (in the order) the Z axis, the North-South axis and the East-West axis.
 It is possible to return to the voltage at the sensor output (Vin in mV) using the following formulas:

$$Data = \frac{Vin(mV)}{CF * Gain}$$

$$CF = 2 * (Range\ of\ measure - 1)$$

Dynamic Range Input

The Dynamic Range Input and the Range of measure are given in the following tables:

Gain	Dynamic range (@ Dyn 5 V)	Gain	Dynamic range (@ Dyn 10 V)	ADC Value (norm)
1	+/- 2.5000 V	1	+/- 5.0000 V	+/- 2500 V
2	+/- 2.5000 V	2	+/- 5.0000 V	+/- 1250 V
4	+/- 1.2500 V	4	+/- 5.0000 V	+/- 625 V
8	+/- 0.6250 V	8	+/- 5.0000 V	+/- 312.5 V
16	+/- 0.3125 V	16	+/- 5.0000 V	+/- 156.25 V
32	+/- 0.1562 V	32	+/- 5.0000 V	+/- 78.125 V
64	+/- 0.0781 V	64	+/- 5.0000 V	+/- 39.0625 V
128	+/- 0.0390 V	128	+/- 5.0000 V	+/- 19.5312 V
256	+/- 0.0195 V	256	+/- 5.0000 V	+/- 9.7656 V
512	+/- 0.0097 V	512	+/- 5.0000 V	+/- 4.8828 V
1024	+/- 0.0048 V	1024	+/- 5.0000 V	+/- 2.4414 V
2048	+/- 0.0024 V	2048	+/- 5.0000 V	+/- 1.2207 V
4096	+/- 0.0012 V	4096	+/- 5.0000 V	+/- 0.6103 V
8192	+/- 0.0006 V	8192	+/- 5.0000 V	+/- 0.3052 V
16384	+/- 0.0003 V	16384	+/- 5.0000 V	+/- 0.1526 V

Frequency in Hz	Number of useful bits	Range of measurement (Counts)
10	20	+/- 924.287
20	20	+/- 924.287
25	20	+/- 924.287
40	20	+/- 924.287
80	20	+/- 924.287
160	18	+/- 131.071
320	17	+/- 65.535
640	16	+/- 32.767
1280	15	+/- 16.383
2560	13	+/- 4.095

The Conversion Factor (CF) can also be found in the header of the data file.

6. OPENING AND DISPLAYING SIGNALS IN GEOPSY

To open a signal file (text file), click on the «Import signal» button and select your file.

To display the temporal signal, drag the file onto the «Graphic» button, or select «Graphic» by right-clicking on the file.



If there are several files in the file box, click on «All signals» to display all temporal signals at the same graph.

Caution ! When you remove a file from the file box, all windows will be closed !



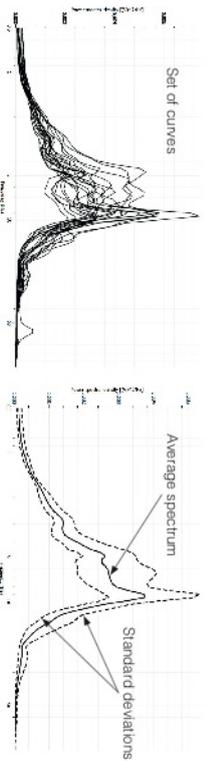
7. FAST FOURIER TRANSFORM IN GEOPSY

To make a Fast Fourier Transform (FFT) of one or more signals, click and drag the file(s) onto the «Spectrum» icon, or select «Spectrum» by right-clicking on the file.

A parameters window appears :

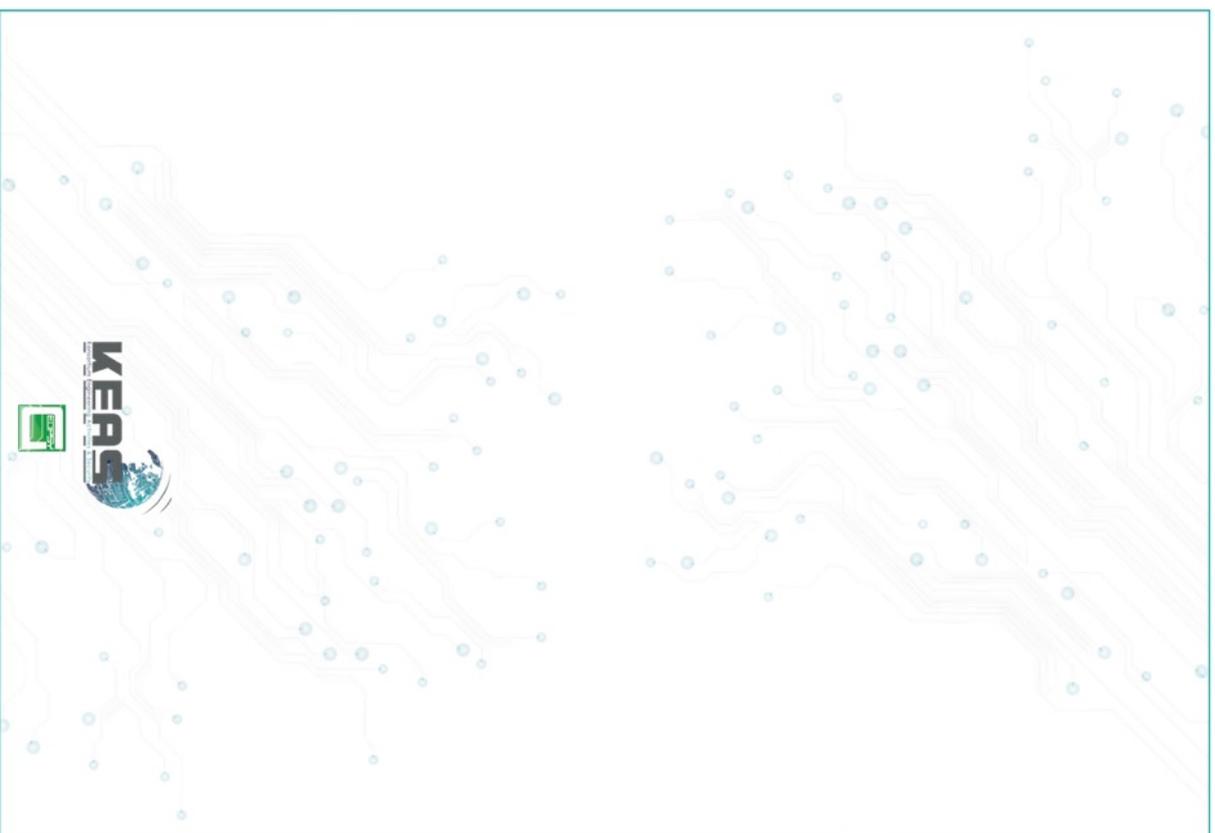
- In the «Time» window, set the «Length» according to the duration of the recordings (in seconds)
 - In the «Output» window, choose the frequency sampling («From» and «To»)
- Then, click on «Start»

Two new windows appear: one displays the Fourier spectrum of each of the signal components (Z, N and E) and the other displays an averaged spectrum (continuous line) and the standard deviations (dashed lines) of the set of signals and components.

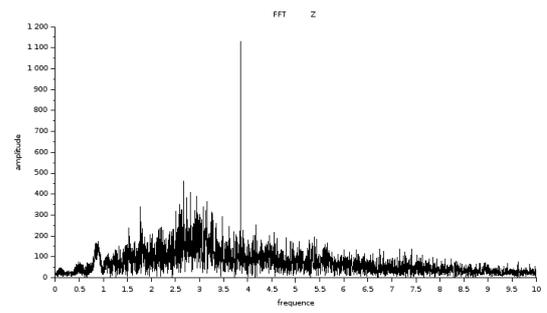
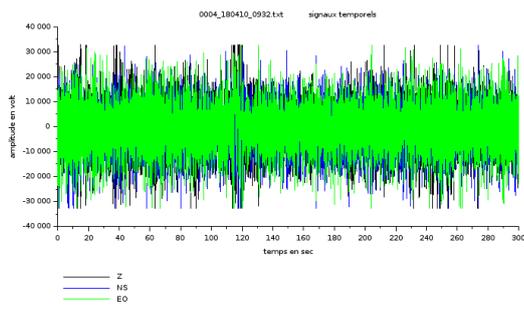


Graphical parameters (as linear/logarithmic scale, dimensions of the window, etc.) can be modified by right-clicking on the graph and selecting «Properties». You can also add elements by right-clicking in the window (not the graph) and select «Insert».

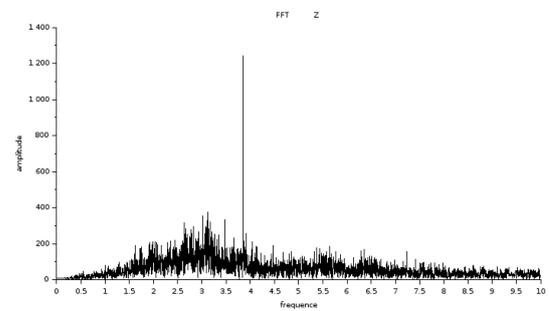
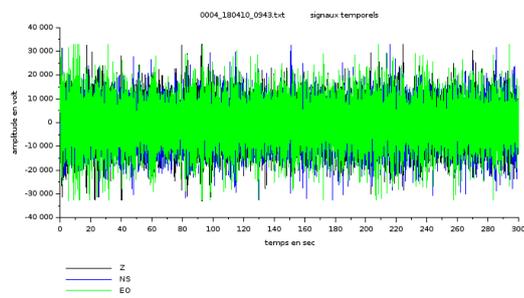
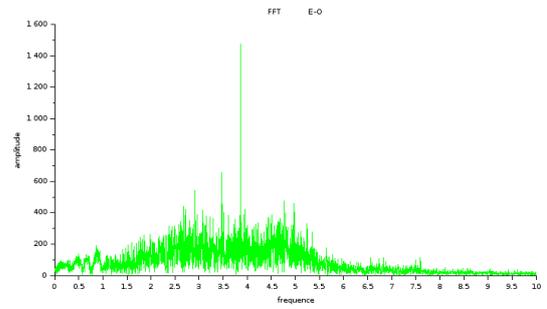
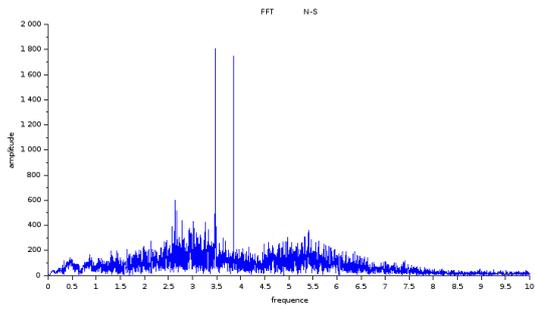
To export the results in a PDF file, right click in the window and select «File» > «Export image».



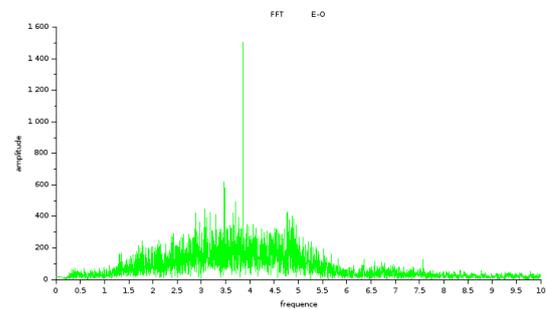
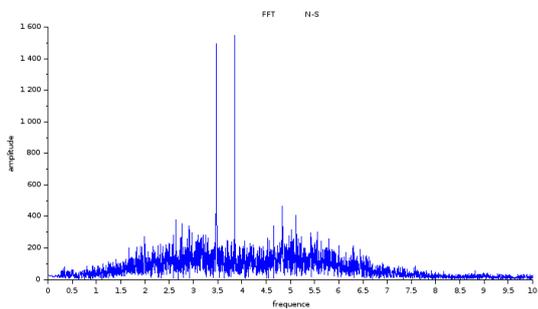
Annexe E : Courbes FFT des essais avec les briques

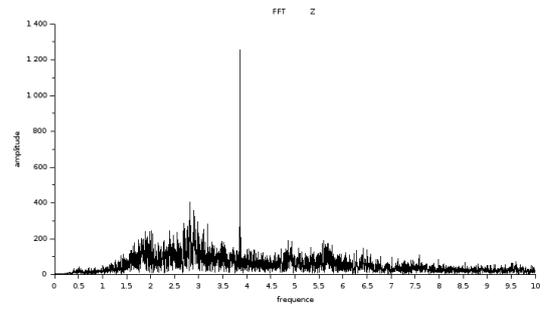
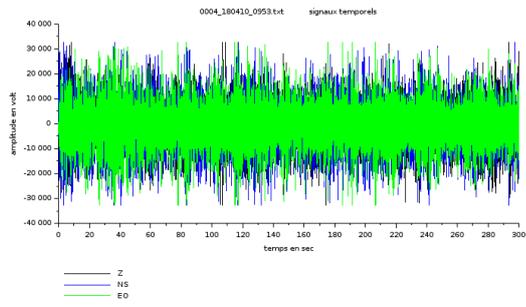


Capteur posé au sol

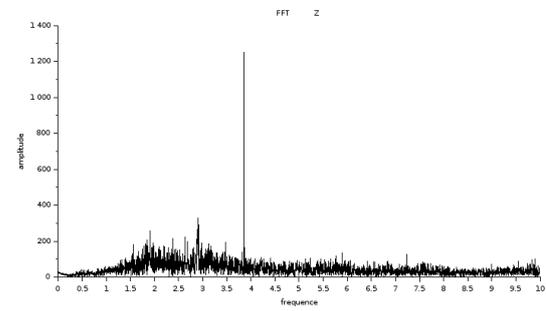
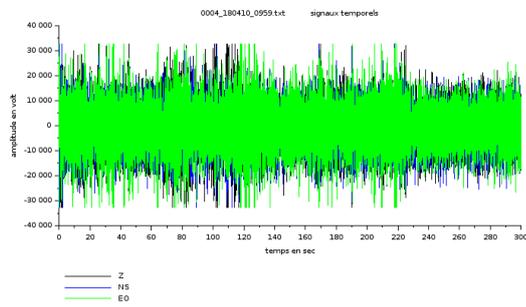
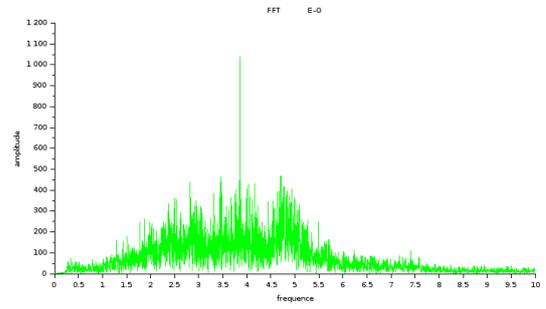
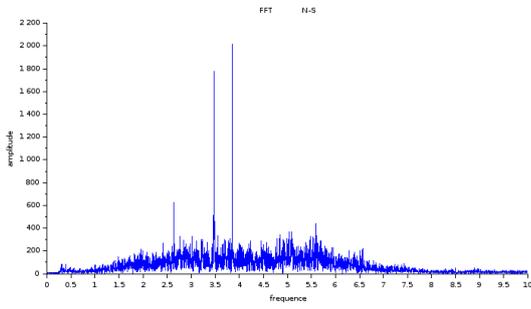


1 brique orientée Sud

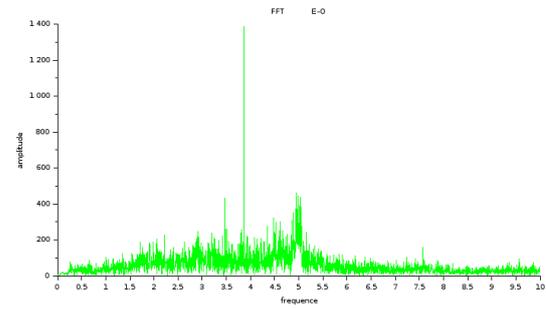
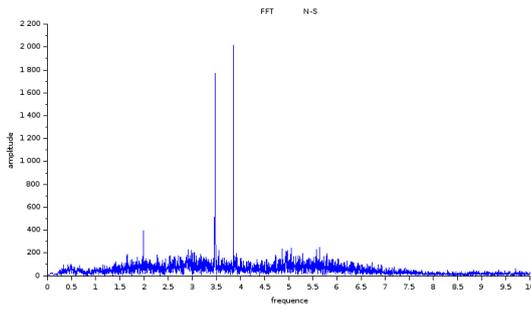


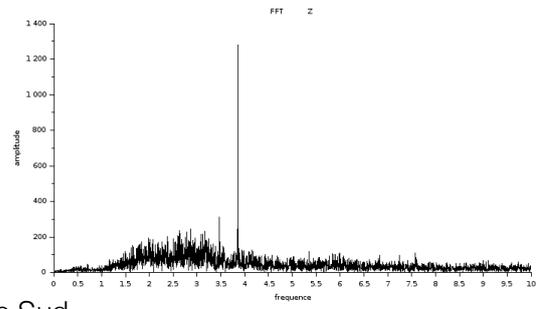
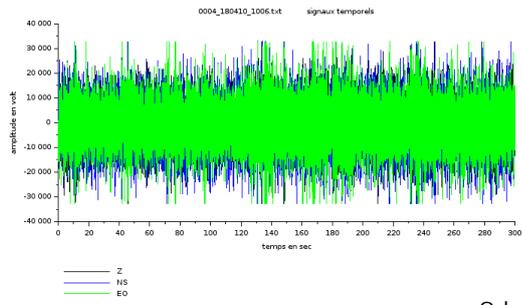


1 brique orientée Nord

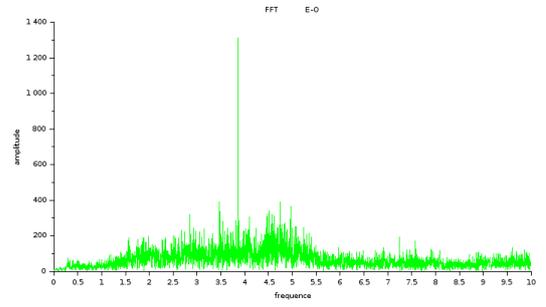
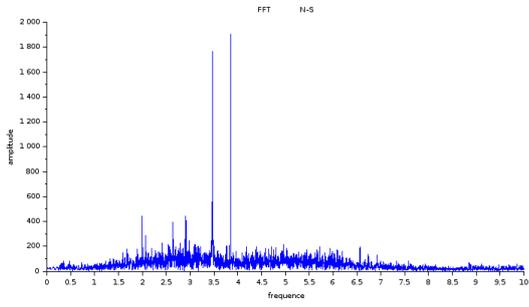


2 brique orientée Sud

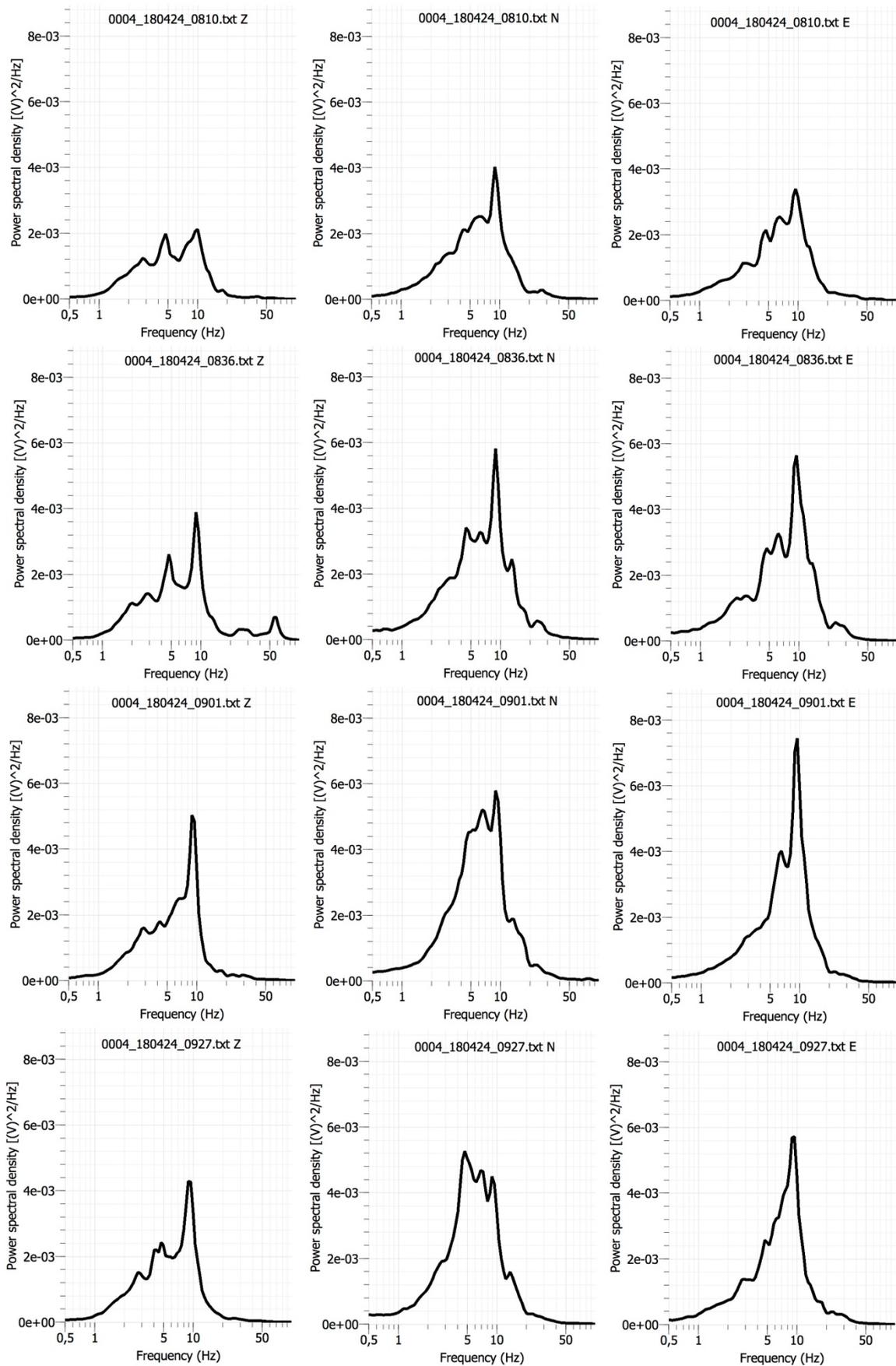


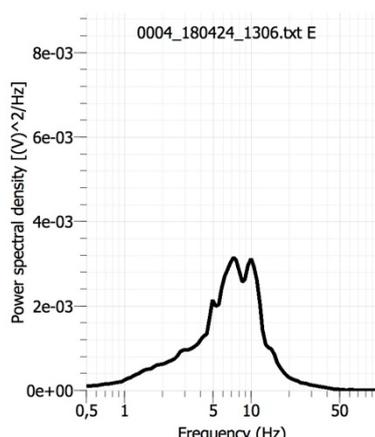
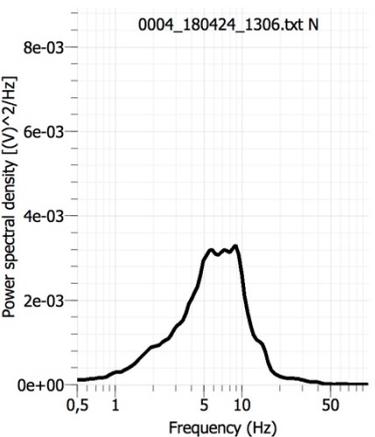
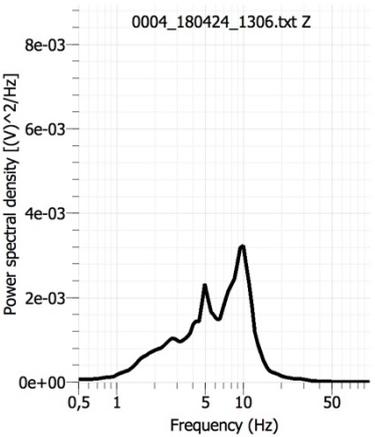
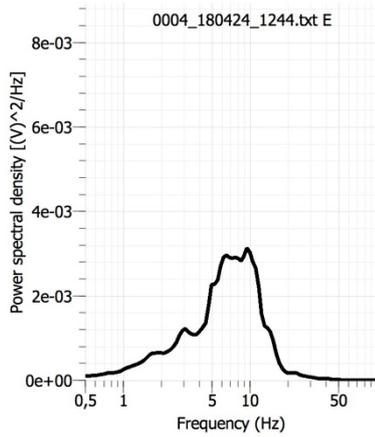
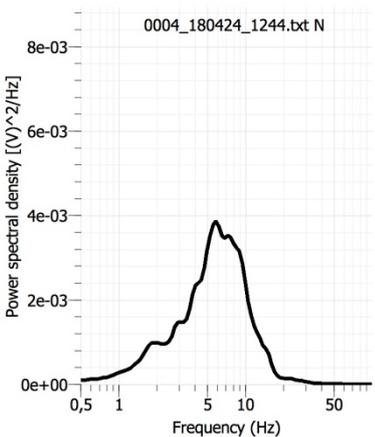
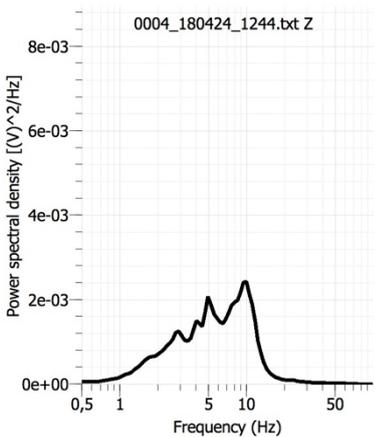
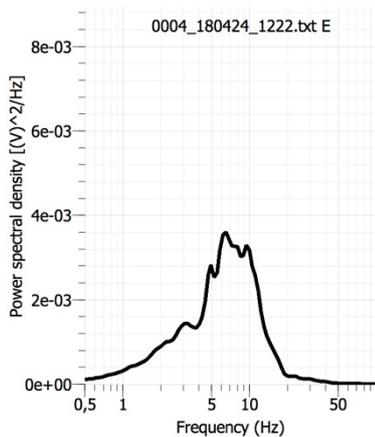
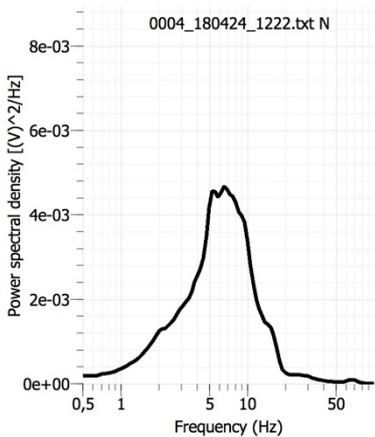
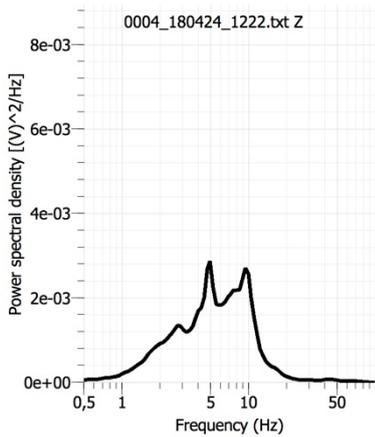


3 briques orientée Sud

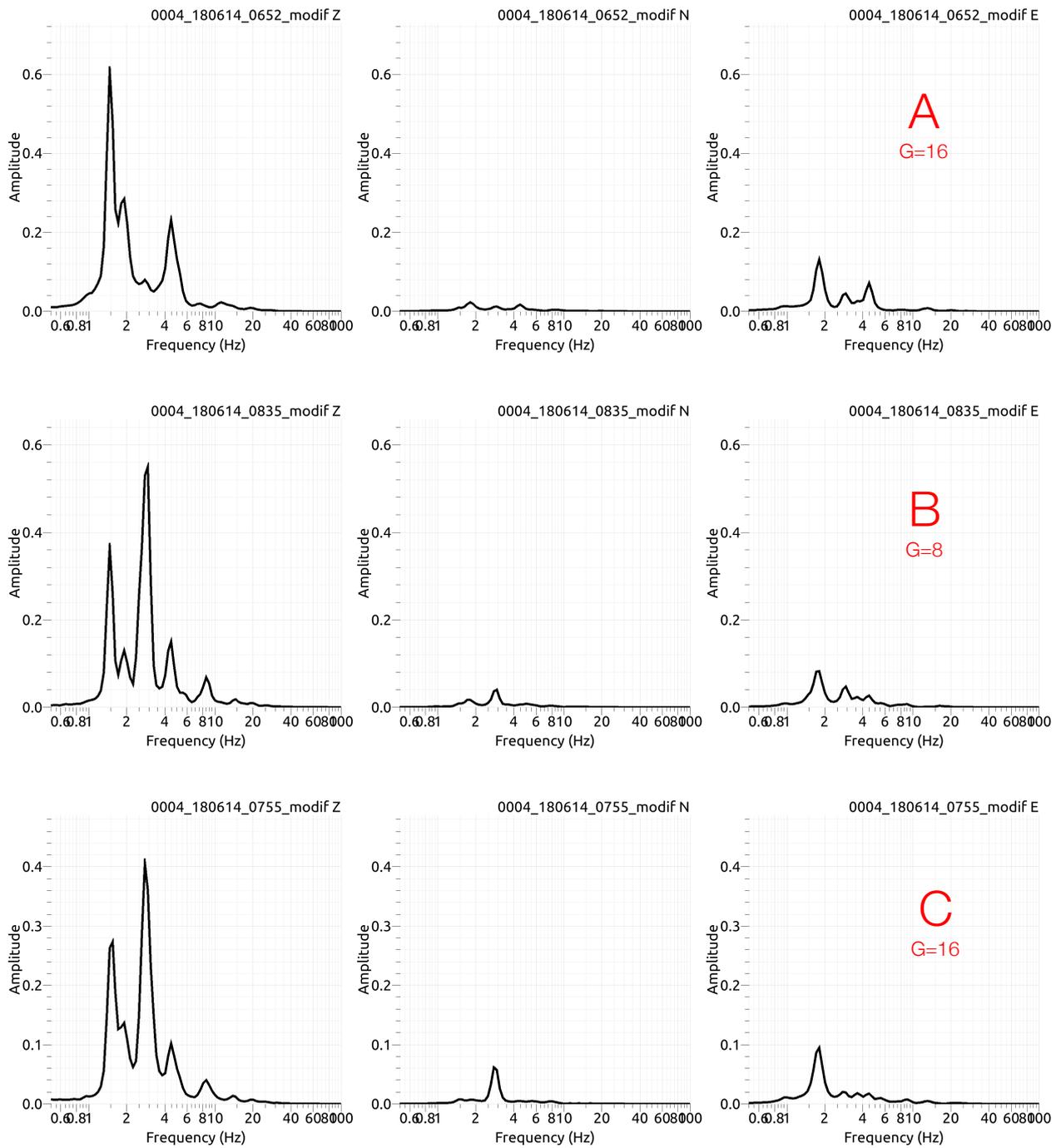


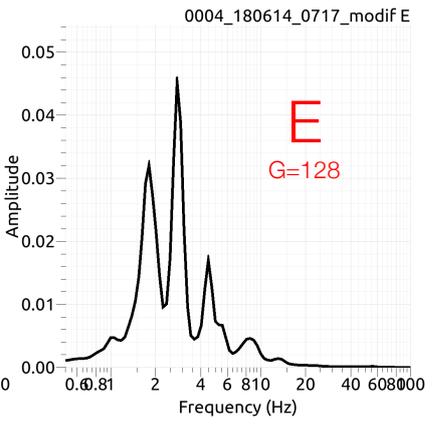
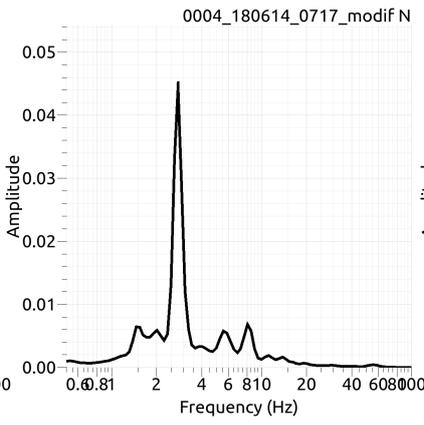
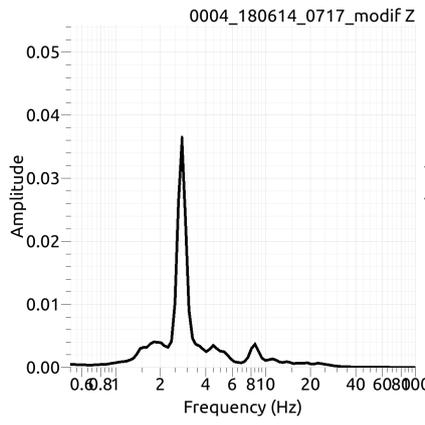
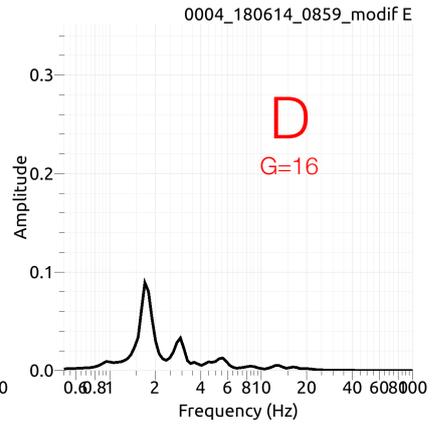
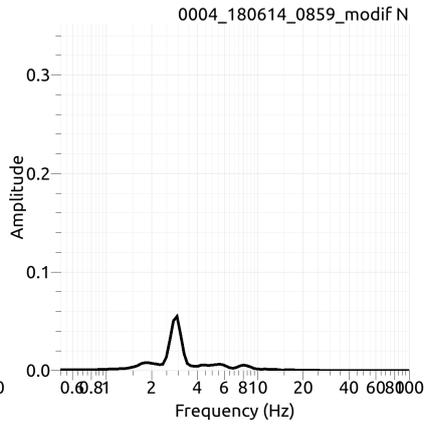
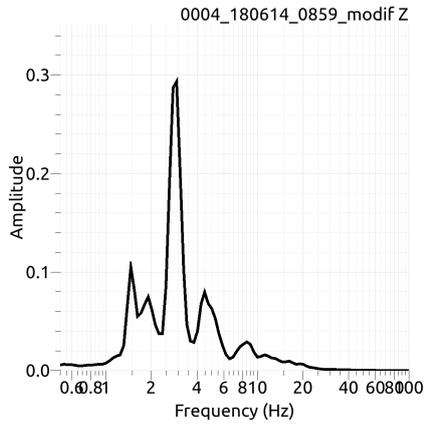
Annexe F : Spectres de Fourier des mesures réalisées sur la Maison en Terre



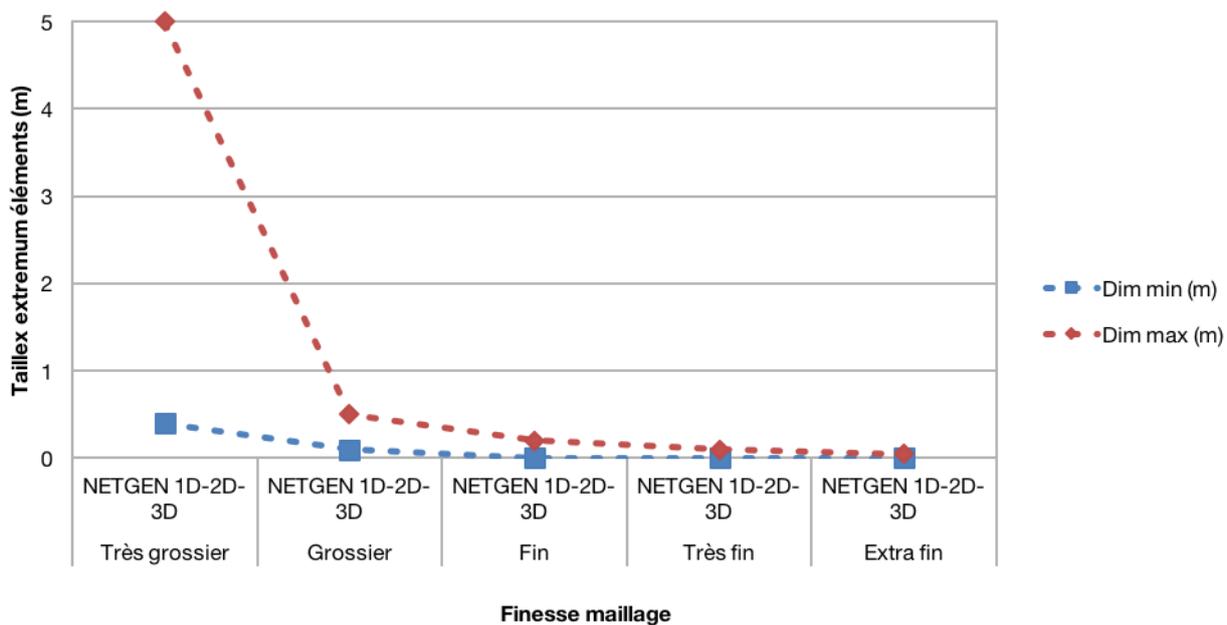
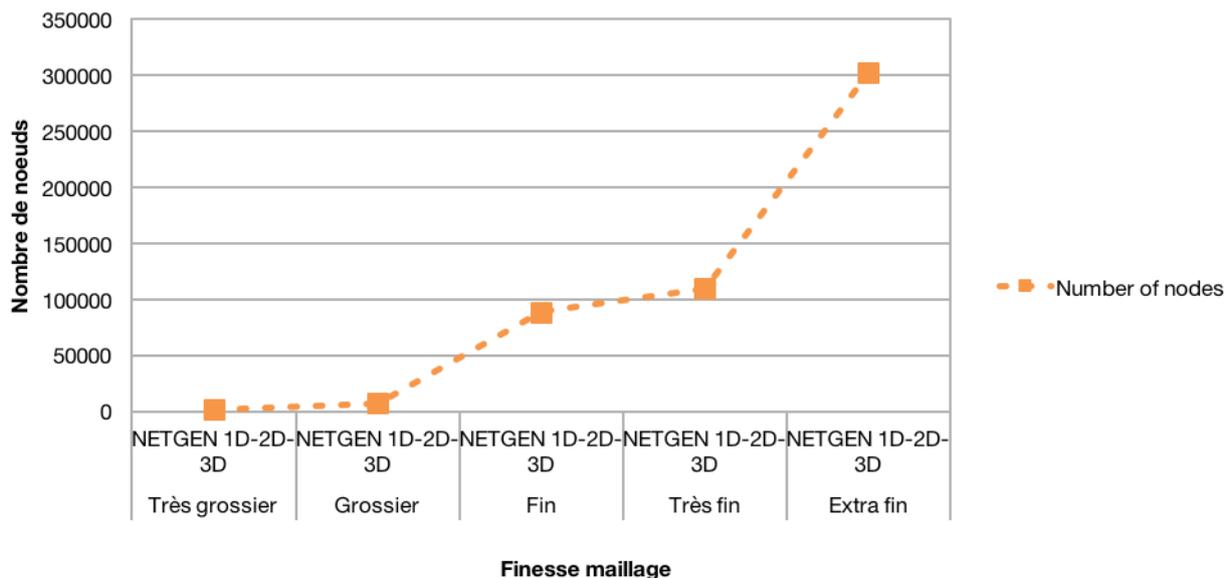


Annexe G : Spectres de Fourier des mesures réalisées sur la passerelle de l'Île d'Amour





Annexe H : Caractéristiques des maillages créés



Annexe I : Analyse des résultats de l'étude statique de la toile

