



HAL
open science

Contributions aux dialogues entre expérimentation et modélisation et en architecture et ingénierie

Yannick Sieffert

► **To cite this version:**

Yannick Sieffert. Contributions aux dialogues entre expérimentation et modélisation et en architecture et ingénierie. Structures. Université de Grenoble, École Doctorale Ingénierie-Matériaux, Mécanique, Environnement, Énergétique, Procédés, Production (IMEP-2), 2016. tel-02392055

HAL Id: tel-02392055

<https://hal.science/tel-02392055>

Submitted on 3 Dec 2019

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.

MÉMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : **Matériaux, Mécanique, Génie Civil, Électrochimie**

Présenté par

Yannick SIEFFERT

préparée au sein du **Laboratoire Sols, Solides, Structures, Risques 3SR**
dans l'**École Doctorale Ingénierie – Matériaux, Mécanique,
Environnement, Énergétique, Procédés, Production (IMEP-2)**

Contributions aux dialogues entre expérimentation et modélisation et en architecture et ingénierie

soutenue publiquement le **18/11/2016**
devant le jury composé de :

M. Abdelhamid BOUHAIR

Professeur à l'Université Blaise Pascal, Rapporteur

M. Laurent DAUDEVILLE

Professeur à l'Université Grenoble Alpes, Examineur

M. Olivier GAGLIARDINI

Professeur à l'Université Grenoble Alpes, Rapporteur

M. Hubert GUILLAUD

Professeur à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble,
Communauté Université Grenoble Alpes, Examineur

M. Christophe PETIT

Professeur à l'Université de Limoges, Rapporteur

Mme Evelyne TOUSSAINT

Professeur à l'Université Blaise Pascal, Examinatrice



Table des matières

Table des matières	ii
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Introduction	1
1 Localisation dans les géomatériaux et non-unicité de la solution	3
1.1 Introduction et objectifs	3
1.2 Approche multiphasique	5
1.2.1 Le modèle hydro-mécanique local non-saturé dans un milieu de second gradient	5
1.2.2 Loi de comportement des matériaux	8
1.2.3 Perte de l'unicité des solutions	9
1.2.4 Non unicité des solutions : quelques exemples	10
1.3 Conclusion et perspectives	20
2 Analyse de la vulnérabilité sismique des constructions traditionnelles	21
2.1 Introduction et objectifs	21
2.2 Approche multi-échelles	23
2.2.1 Présentation	23
2.2.2 Haïti : exemple de la démarche	24
2.2.3 Les quatre échelles	24
2.3 La corrélation d'images	38
2.4 Conclusion et perspectives	44
3 Opérationnel et interdisciplinarité	47
3.1 Introduction et objectifs	47
3.2 De nouveaux enjeux nécessitant la collaboration	49
3.2.1 La soutenabilité	49
3.2.2 Les méfaits de la mondialisation	50
3.3 Collaboration interdisciplinaire opérationnelle et recherche	55
3.4 Collaboration interdisciplinaire opérationnelle et pédagogique	58
3.4.1 Favoriser le travail collaboratif	59
3.4.2 Université et société	61
3.5 Conclusion et perspectives	64

Conclusions et perspectives	65
3.6 Bilan	65
3.7 Perspectives de recherche	67
Bibliographie	75

Table des figures

1.1	Élément parent hydro-mécanique second gradient	8
1.2	Algorithme de Newton-Raphson pour une fonction à une variable $y = f(x)$. . .	10
1.3	Index plastique pour les solutions axisymétriques	11
1.4	Second invariant des déformations pour des solutions localisées	12
1.5	Superposition des réponses pour les deux maillages	12
1.6	Second invariant des déformations : autres solutions avec le maillage fin (22354 éléments)	13
1.7	Second invariant des déformations : autres solutions avec le maillage très fin (82944 éléments)	13
1.8	Résultats expérimentaux montrant des bandes de localisation en spirale et conjuguées	13
1.9	L'index plastique à la fin de la phase de creusement	15
1.10	Second invariant des déformations à la fin de la phase d'excavation	15
1.11	L'index plastique à la fin de la phase de stabilisation	16
1.12	Second invariant des déformations à la fin de la phase de stabilisation	17
1.13	Résultat expérimental d'après Labiouse <i>et al.</i> [2014]	17
1.14	Débit d'eau sortant de la cavité interne	18
1.15	Évolution de deux solutions dont l'initiation de la plasticité est différente	20
2.1	Amélioration proposée de la culture constructive locale	24
2.2	Les 4 échelles de l'approche multi-échelles	25
2.3	Échelle 1 : connexion par un feuillard métallique	26
2.4	Calage du modèle phénoménologique des essais de traction en quasi-statique . . .	26
2.5	Calage du modèle phénoménologique des essais de cisaillement en quasi-statique	26
2.6	Échelle 2 : la cellule élémentaire	27
2.7	Échelle 2 : Le mini-mur de réaction	27
2.8	Échelle 2 : modélisation détaillée de la cellule	28
2.9	Échelle 2 : calibration du macro-élément	28
2.10	Banc d'essai du CNR-Ivalsa	28
2.11	Essais de cisaillement en quasi-statiques pour un mur avec ou sans remplissage	29
2.12	Diagramme Force-Drift des murs avec ou sans remplissage	29
2.13	Échelle 3 : assemblage des macro-éléments	30
2.14	Échelle 3 : comparaison numérique/expérimental	30
2.15	Échelle 3 : comparaison numérique/expérimental (essai cyclique 1) sur l'énergie cumulée	31
2.16	La maison réalisée sur la table vibrante	32
2.17	Dimensions d'un mur de cisaillement	32
2.18	Contenu fréquentiel et en temps des signaux correspondants à Haïti 100% et à Guadeloupe 100%	34

2.19	FRF des bruits blancs effectués après chaque signal	35
2.20	Modes propres de la structures obtenus expérimentalement avant les essais sismiques	36
2.21	Maillage de la structure	36
2.22	Répartition de la masse du remplissage aux nœuds	36
2.23	Modes propres de la structures obtenus numériquement	37
2.24	Comparaison du déplacement en tête du mur de cisaillement (pour tout le signal et pour un zoom)	37
2.25	Caméra Phantom v641	39
2.26	Vue globale du système utilisé (mur de cisaillement, éclairage et position de la caméra)	39
2.27	Projection de la peinture et vue spécifique du mouchetis	40
2.28	Haïti 300% - Comparaison entre la CIN et LVDT pour le déplacement de la table vibrante (pour tout le signal et pour un zoom contenant les pics)	41
2.29	Champs de déplacement pour Haïti 300%	42
2.30	Position des diagonales continues dans les croix de Saint-André	42
2.31	Décollement maximum entre les diagonales non-continues	42
2.32	Accélération : comparaison entre la CIN et un accéléromètre sur la table vi- brante (pour tout le signal et pour un zoom contenant les pics)	43
2.33	FFT : comparaison entre la CIN et un accéléromètre sur la table vibrante (pour tout le signal)	43
2.34	Force globale du mur de cisaillement en fonction du déplacement à droite en tête	44
2.35	Faciès de fissuration d'un mur en adobe avec ou sans inclusion	45
2.36	Projet de table vibrante à 3SR	46
3.1	Augmentation des coûts des risques naturels, d'après Hyndman et Hyndman [2015]	52
3.2	Port-au-Prince, reconstruction décembre 2014	52
3.3	Haïti : deux structures à Port-au-Prince. D'après Paultre <i>et al.</i> [2013]	53
3.4	Pourcentage de structure traditionnelle ou en béton armé suivant l'endomma- gement. Compilation des données provenant de Gülhan et Güney [2000]	54
3.5	Turquie : deux structures à une rue de distance. D'après Langenbach [2008] . .	54
3.6	Turquie : deux exemples de deux structures adjacentes. D'après Doğangün <i>et al.</i> [2006]	55
3.7	Haïti, Port au prince, 2010. D'après la Fédération International de la Croix- Rouge et du croissant-Rouge (https://www.flickr.com/photos/ifrc/4273274509/in/gallery-vaughndewar-72157623210861638/)	55
3.8	Projets de reconstruction	56
3.9	Projets de reconstruction avec 1 étage	57
3.10	Constructions dans le quartier historique du centre de Liège	61
3.11	Constructions sur le site la friche la Belle de Mai	61
3.12	Constructions à Barjols	61
3.13	Exemple de réalisation de <i>Rural Studio</i>	63
3.14	Le croc-aux-livres	64
3.15	Dalle d'essai structures DESSIS et le mur de réaction	67
3.16	Sous-structuration d'un essai pseudo-dynamique	67
3.17	Renforcements verticaux	69

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques de la table vibrante	32
2.2	Protocole expérimental	35
2.3	Configuration utilisée	39
2.4	Valeur de la raideur effective	44

Résumé

Le domaine de la construction impacte fortement l'environnement écologique de notre planète. Cela conduit à une détérioration de notre milieu et à une augmentation des risques naturels mais aussi technologiques, rendant l'humain plus vulnérable. Pour évaluer la vulnérabilité, les phénomènes à reproduire sont complexes, fortement non-linéaires et se déclinent à différentes échelles spatiales et de temps. Le développement des connaissances scientifiques est un outil d'aide à la décision des grandes orientations pour la construction de demain. En cela, la recherche doit être source de questionnements et force de propositions.

Le travail présenté ici vise à développer des méthodes et des analyses afin de proposer des modélisations en dialogue avec des expérimentations et cela à différentes échelles. Il s'articule autour de trois chapitres présentant successivement la non-unicité des solutions d'un problème aux limites modélisant la localisation des géomatériaux, la caractérisation de la vulnérabilité d'une structure vernaculaire soumise à un séisme et pour finir la nécessité de développer des recherches interdisciplinaires afin d'adapter la construction aux nouveaux enjeux de la soutenabilité et de la résilience.

Ce mémoire est une synthèse non exhaustive de mes principaux travaux de recherche effectués depuis une dizaine d'années et il donne les pistes d'orientation que je compte poursuivre.

Introduction

L'activité humaine crée un déséquilibre sur les écosystèmes de notre planète. Actuellement, l'augmentation des températures ne fait plus aucun doute et l'enjeu aujourd'hui est d'essayer de contenir son augmentation (en vitesse comme en amplitude). Mais d'autres difficultés s'annoncent aussi, particulièrement problématiques pour le Génie Civil, l'épuisement des ressources naturelles et l'augmentation des catastrophes naturelles (en fréquence comme en amplitude). Nous sommes actuellement à une époque de transition par rapport à l'environnement et à sa dégradation irréversible et la recherche, qu'elle soit théorique ou appliquée, doit permettre d'augmenter les connaissances scientifiques afin de construire le monde de demain dans une optique vertueuse et soutenable pour les générations futures.

La recherche présentée dans ce mémoire s'articule autour d'enjeux sociétaux liés à la soutenabilité dans le domaine du Génie Civil. Elle tend à essayer de rapprocher des domaines ou des disciplines qui sont usuellement assez éloignés afin d'apporter des réponses plus efficaces. Dans ce contexte, cette recherche scientifique s'alimente d'observation sur le terrain et d'expérimentation en laboratoire qui permettent d'affirmer ou de questionner les résultats obtenus.

En cela, cette recherche se nourrit du nécessaire dialogue entre l'expérimentation et la modélisation que j'ai toujours développé au cours de ma carrière tout en le faisant évoluer. En effet, au cours de mon doctorat, j'ai de façon classique confronté les résultats numériques à des essais expérimentaux afin de valider une méthode de modélisation. Puis, en tant qu'enseignant-chercheur, le dialogue expérimental/modélisation s'est enrichi, passant de la simple confrontation à l'interaction pour décrire plus fidèlement des phénomènes complexes et proposer des méthodes de modélisation prédictive. L'objectif n'est donc pas uniquement d'utiliser l'expérimental pour permettre le calage ou la validation des modèles numériques mais bien, dans une approche multi-échelles, d'utiliser les observations visuelles à plusieurs échelles (de la matière ou de la structure) afin de développer des modèles numériques se déclinant aussi à plusieurs échelles de façon totalement couplées. Cette compétence multi-échelles à travers le dialogue expérimental/modélisation me permet d'investir deux axes de recherche, à différentes échelles : celui du matériau et celui de la structure. Différentes échelles de temps sont aussi étudiées provenant de la sollicitation, passant d'un chargement quasi-statique à celui dynamique d'un séisme mettant en jeu les effets inertiels.

Le premier chapitre concerne la modélisation de cavité pouvant servir de stockage en profondeur à des déchets radioactifs ou à du stockage de CO₂. Outre cet objectif sociétal, il vient questionner la pertinence des modélisations numériques dont la composante adoucissante du matériau est prise en compte. En particulier, il montre que même en utilisant des modèles numériques complexes, multi-échelles, permettant d'assurer l'objectivité des résultats par rapport au maillage par la prise en compte de la microstructure, l'unicité des solutions n'est pas rétablie. À composante assez théorique, ce chapitre donne des indications sur l'impact des

différentes solutions obtenues par rapport à la question de sécurité liée aux transferts dans le milieu naturel des produits stockés. Il interroge aussi sur la certitude apparente de la validité des résultats numériques dont la convergence est conforme au niveau d'exigence.

Le deuxième chapitre concerne l'évaluation de la vulnérabilité sismique d'un habitat utilisé lors de la reconstruction d'Haïti et basé sur la culture constructive locale. Il met en lumière l'intérêt de la méthode multi-échelles mise en place afin de mener, grâce à des dialogues à différentes échelles entre expérimental/modélisation, des modèles numériques simplifiés et particulièrement robustes et adaptés pour la modélisation de l'échelle du bâti sous une sollicitation de séisme. Il permet aussi de démontrer la pertinence d'utiliser des méthodes expérimentales pointues et novatrices afin d'appréhender plus finement le comportement dissipatif de ce type de constructions. Enfin, c'est la première fois que ce type de constructions est caractérisé, apportant un outil de dimensionnement pour une construction vernaculaire.

Enfin le dernier chapitre montre la nécessité de réaliser des collaborations entre disciplines afin d'apporter des solutions pertinentes aux enjeux de demain. Il s'attelle à décroiser deux recherches souvent en dichotomie, celle entre sciences et technologies de l'ingénieur (STI) et sciences humaines et sociales (SHS) et celle entre recherche académique et recherche opérationnelle. En effet, l'impact humain sur l'environnement - pour être évalué correctement - doit être aujourd'hui considéré dans une démarche globale et non à l'échelle locale de disciplines spécialisées et autonomes. À travers différents exemples liés au domaine de la construction, ce chapitre montre l'intérêt d'une collaboration entre architectes et ingénieurs pour proposer des solutions écologiquement soutenables et permettant d'atteindre une meilleure résilience des sociétés à travers des structures adaptées à leurs contraintes et à leurs identités. Ce chapitre montre aussi que l'interdisciplinarité permet de mettre en place une recherche plus aboutie et plus enrichie pour les différentes disciplines. Enfin, il ouvre des perspectives fortes pour l'avenir.

Pour chaque chapitre, les thèses, les publications et les programmes de recherche associés au chapitre, sont présentés.

Chapitre 1

Localisation dans les géomatériaux et non-unicité de la solution

1.1 Introduction et objectifs

La localisation des déformations dans les géomatériaux conduit à une concentration spatiale de la déformation : l'amplitude de la déformation croît de façon très importante à l'intérieur de la (des) bande(s) de localisation. Cette déformation majeure conduit à une altération notable de la résistance du matériau, pouvant parfois conduire à une fissuration, correspondante à une discontinuité matérielle.

D'un point de vue mathématique, la localisation des déformations peut être considérée comme un phénomène de bifurcation, c'est-à-dire qu'il y a transition d'un chemin fondamental de comportement vers un chemin alternatif. Le phénomène de localisation des déformations correspond donc à la perte d'unicité de la solution du problème aux limites considérées.

Sur un plan théorique, la post-localisation ou post-bifurcation commence dès que le critère de bifurcation est vérifié. Même si les milieux classiques de la mécanique des milieux continus permettent parfois de connaître l'instant d'apparition d'une bande de cisaillement, ils ne permettent pas de suivre l'évolution de la localisation. La microstructure n'étant pas considérée, les hétérogénéités dues à la microstructure n'interviennent pas et aucune longueur interne caractéristique du milieu n'est introduite. Les solutions post-localisées sont donc infinies et dépendent du maillage utilisé. Ce n'est évidemment pas physiquement admissible. Plusieurs méthodes ont été développées afin d'incorporer à la modélisation du matériau une échelle de longueur interne et restaurer l'objectivité de la solution aux maillages définis par l'utilisateur. Les modèles de second gradient sont l'une des solutions puisque la description cinématique est enrichie pour tenir compte de la microstructure.

Nous utilisons des modèles locaux de second gradient. A la différence des modèles non-locaux de second gradient (par exemple [Vardoulakis et Aifantis \[1991\]](#), [De Borst et Mühlhaus \[1992\]](#) ou [Mühlhaus et Aifantis \[1991\]](#)) qui sont en fait des extensions d'une loi de comportement donné (plasticité, endommagement,...), nos modèles sont écrits dans un cadre général, en enrichissant la cinématique classique d'un champ du second ordre correspondant à la microstructure. Ce cadre général permet d'utiliser telles quelles les lois de comportement (des milieux classiques) déjà existants dans les codes d'éléments finis.

Cependant, si la prise en compte de la microstructure ou l'introduction d'une longueur interne permettent bien d'obtenir des solutions indépendantes de la discrétisation spatiale utilisée, ceci ne permet pas de restaurer l'unicité de la solution d'un problème aux limites dans le régime post-localisé. Le cadre théorique de la bifurcation nous permet d'affirmer que le nombre de solutions est infini. Cependant, le passage à une résolution numérique du problème restreint

le nombre de solutions à celles compatibles avec la discrétisation employée (spatiale comme temporelle). Dès lors, seuls des testes numériques sont capables de nous montrer les différentes formes de localisation que nous pouvons exhiber. De façon synthétique, nous présenterons les résultats les plus significatifs que nous avons obtenus ces dix dernières années.

Précisons que nous utilisons, de façon historique, le code de calcul aux éléments finis développés par l'Université de Liège ([Charlier \[1987\]](#)) et dans lequel nous développons nos propres modèles. Ce code est défini en grande déformation.

Thèses associées à ce chapitre

Ferdinando Marinelli, "Comportement couplé des géomatériaux : deux approches de modélisation numérique", thèse de l'Université de Grenoble, soutenue le 21 janvier 2013.

- Co-encadrants : René Chambon (50%) et Yannick Sieffert (50%)
- Sujet de recherche : deux approches distinctes ont été réalisées au cours de ce travail de thèse afin de décrire le couplage hydromécanique des géomatériaux. Dans une approche de type phénoménologique le milieu poreux a été traité comme un milieu continu équivalent dont les interactions entre la phase fluide et le squelette solide constituent le couplage du mélange à l'échelle macroscopique. Cette approche a été utilisée pour modéliser des essais expérimentaux sur un cylindre creux pour une roche argileuse. Dans une deuxième approche, la microstructure étudiée est caractérisée avec des grains et un réseau de canaux pour la phase fluide. À l'aide d'un processus numérique d'homogénéisation, la contrainte du mélange et le flux massique sont calculés. Cette méthode d'homogénéisation numérique a été implémentée dans un code aux éléments finis afin d'obtenir la réponse macroscopique du milieu de type second gradient.

Khadijato El Moustapha, "Identification d'une loi de comportement enrichie pour les géomatériaux en présence d'une localisation de la déformation", thèse de l'Université de Grenoble soutenue le 23 avril 2014.

- Co-encadrants : Pierre Bésuelle (50%) et Yannick Sieffert (50%)
- Sujet de recherche : l'objectif de cette thèse était de mettre en place une méthode d'identification d'une loi de comportement enrichie de type second gradient. La procédure d'identification développée s'appuie sur des résultats expérimentaux d'essais mécaniques sur le grès des Vosges pour lesquels le mode de déformation des échantillons a été caractérisé à l'aide de mesure de champs cinématiques, y compris en régime localisé. La première partie de l'étude de sensibilité a porté sur la partie homogène des essais. La deuxième partie concernait le régime de déformation localisée et permet le calcul d'une matrice de sensibilité servant par la suite à optimiser les observables.

Publications associées à ce chapitre

[Sieffert et al. \[2009\]](#) → **Y. SIEFFERT**, S. AL HOLO, R. CHAMBON, « Loss of uniqueness of numerical solutions of the borehole problem modelled with enhanced media », International Journal of Solids and Structures, vol. 46, 2009, pp 3173-3197.

[Sieffert et al. \[2014a\]](#) → **Y. SIEFFERT**, O. BUZZI, F. COLLIN « Numerical study of shear band instability and effect of cavitation on the response of a specimen under undrained biaxial loading », International Journal of Solids and Structures , vol. 51, 2014, pp 1686-1696.

[Marinelli et al. \[2015\]](#) → **F. MARINELLI**, **Y. SIEFFERT**, **R. CHAMBON** « Hydromechanical

modeling of an initial boundary value problem : Studies of non-uniqueness with a second gradient continuum», *International Journal of Solids and Structures*, vol.54, 2015, pp 238-257.

Programmes de recherche associés à ce chapitre

Timodaz (Thermal Impact on the Damaged Zone Around a Radioactive Waste Disposal in Clay Host Rocks) : Projet Européen co-financé par la Commission Européenne (sixth Euratom research and training Framework Programme (FP6) on nuclear energy), période 2006-2010, montant 170 keuros, en charge du programme numérique.

Geobridge : ANR non thématique, période 2009-2013, montant 403 keuros.

1.2 Approche multiphasique

Lors de mon recrutement au laboratoire 3SR en 2005, les milieux de second gradient avaient été largement étudiés et cela depuis une dizaine d'année. Cependant ces études avaient été réalisées dans le cadre purement mécanique. J'ai alors entrepris d'ajouter la prise en compte des couplages physiques, par exemple en considérant un matériau poreux rempli d'un liquide. En effet, la localisation peut entraîner des variations de porosité et des variations de pressions interstitielles ainsi que des changements de propriété de transport à l'intérieur des bandes localisées. De plus, la prise en compte de la présence d'un fluide dans ce type de milieu s'accompagne aussi de la prise en compte de la saturation ou non du milieu en eau et de son évolution. En se référant aux travaux expérimentaux de [Mokni et Desrues \[1999\]](#), il était évident que les modèles numériques devaient d'une part prendre en compte la propriété de dilataance des géomatériaux et d'autre part la possibilité de la cavitation de l'eau dans les bandes de localisation, créant une désaturation du milieu.

J'ai donc implémenté dans le code aux éléments finis Lagamine, en collaboration avec l'Université de Liège (Belgique) et l'Université de Newcastle (Australie), un élément hydro-mécanique non saturé dans un milieu de second gradient. Les équations principales de ce modèle sont présentées ci-dessous. Puis, j'ai poursuivi les études sur la non-unicité en utilisant des lois de comportement et des milieux de complexité croissante.

1.2.1 Le modèle hydro-mécanique local non-saturé dans un milieu de second gradient

Tout d'abord rappelons le cadre général du modèle hydro-mécanique local second-gradient. Une description cinématique enrichie du continuum est utilisée. En plus du champ classique de déplacement u_i est introduit un tenseur de second ordre nommé le gradient des micro-déformations v_{ij} . Ce type de milieu avec micro-structure a été défini par [Mindlin \[1964\]](#) et par [Germain \[1973\]](#). Partant de ces modèles, nous pouvons restreindre la cinématique du milieu par l'assomption que les micro-déformations sont égales au gradient des macro-déplacements (i.e. les macro-déformations) :

$$(1.1) \quad v_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_{ij} \quad \text{et} \quad v_{ij}^* = \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j} = F_{ij}^*$$

F_{ij} et F_{ij}^* sont le gradient des macro-déplacement et sa forme virtuelle.

Utilisons maintenant le cadre classique de la poro-mécanique basée sur les théories de [Hasanizadeh et Gray \[1979a\]](#) et [Hassanizadeh et Gray \[1979b\]](#). De plus, écrivons les équations

d'équilibre pour le milieu mixte bi-phasique et aussi pour les deux phases indépendamment (solide et eau). La densité massique du milieu bi-phasique est alors :

$$(1.2) \quad \varrho^{mix,t} = \varrho^s(1 - \phi^t) + \varrho^{w,t}\phi^t$$

ϱ^s est la densité de la partie solide (assumée comme incompressible), $\varrho^{w,t}$ est la densité du fluide, ϕ^t est la porosité définie comme $\phi^t = \Omega^{w,t}/\Omega^t$ où Ω^t est le volume courant d'une masse donnée du squelette et $\Omega^{w,t}$ celui correspond au volume du fluide.

Le fluide est considéré comme compressible, i.e. la densité du fluide augmente en fonction de la pression de pore p . k^w est le module de perméabilité du fluide : $\dot{\varrho}^{w,t} = \frac{\varrho^{w,t}}{k^w} \dot{p}^t$.

Concernant le tenseur des contraintes nous avons :

$$(1.3) \quad \sigma_{ij}^t = \sigma'_{ij}{}^t - p^t \delta_{ij}$$

σ_{ij}^t est la contrainte totale, $\sigma'_{ij}{}^t$ est la contrainte effective et δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

A partir des équations 1.2 et 1.3 nous ajoutons la troisième phase, celle gazeuse. Pour cela, nous introduisons $S_r^{w,t}$ le degré relatif de saturation en eau du milieu et $S_r^{g,t}$ celui du gaz :

$$(1.4) \quad S_r^{w,t} + S_r^{g,t} = 1$$

La densité de la mixture vaut alors :

$$(1.5) \quad \varrho^{mix,t} = \varrho^s(1 - \phi^t) + S_r^{w,t} \varrho^{w,t} \phi^t + (1 - S_r^{w,t}) \varrho^g \phi^t$$

Et la contrainte totale :

$$(1.6) \quad \sigma_{ij}^t = \sigma'_{ij}{}^t - S_r^{w,t} p^{w,t} \delta_{ij} - S_r^{g,t} p^g \delta_{ij}$$

Le principe des travaux virtuelles pour la mixture peut alors s'écrire dans sa forme faible :

$$(1.7) \int_{\Omega^t} \left(\sigma_{ij}^t \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^t} + \Sigma_{ijk}^t \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^t \partial x_k^t} \right) d\Omega^t = \int_{\Omega^t} \varrho^{mix,t} g_i u_i^* d\Omega^t + \int_{\Gamma_\sigma^t} (\bar{t}_i u_i^* + \bar{T}_i D u_i^*) d\Gamma^t$$

où u_i^* est le champ cinématique virtuel admissible des déplacements, σ_{ij}^t est la contrainte de Cauchy (contrainte totale), Σ_{ijk}^t est la double contrainte duale du second gradient cinématique virtuel, x_i sont les coordonnées courantes, g_i est l'accélération de la gravité, \bar{t}_i est la force externe (classique) par unité d'aire et \bar{T}_i est la double force additionnelle externe par unité d'aire, les deux sont appliquées sur la frontière Γ_σ^t de Ω^t . D dénote la dérivée normale de q , ($Dq = (\partial q / \partial x_k) n_k$). L'équation du travail virtuel du second gradient ci-dessus nécessite l'utilisation d'élément C^1 pour les champs de déplacement à cause de la présence du champ de la seconde dérivée du déplacement. Afin d'utiliser des éléments C^0 , l'égalité entre v_{ij}^* et F_{ij}^* et entre v_{ij} et F_{ij} est introduite par des multiplicateurs de Lagrange λ_{ij} en relation avec la forme faible des contraintes (Eq. 1.1)(see Matsushima et al. [2002]) :

$$(1.8) \quad \int_{\Omega^t} \left(\sigma_{ij}^t \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^t} + \Sigma_{ijk}^t \frac{\partial v_{ij}^*}{\partial x_k^t} \right) d\Omega^t - \int_{\Omega^t} \lambda_{ij}^* \left(\frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^t} - v_{ij}^* \right) d\Omega^t = \int_{\Omega^t} \varrho^{mix,t} g_i u_i^* d\Omega^t + \int_{\Gamma_\sigma^t} (\bar{t}_i u_i^* + \bar{T}_i v_{ik}^* n_k) d\Gamma^t,$$

$$(1.9) \quad \int_{\Omega^t} \lambda_{ij}^* \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j^t} - v_{ij}^t \right) d\Omega^t = 0.$$

Dans un volume Ω^t , la masse d'eau est égale à $M_{\Omega^t}^{w,t} = S_r^{w,t} \rho^{w,t} \phi^t \Omega^t$ et la masse de gaz est égale à $M_{\Omega^t}^{g,t} = S_r^{g,t} \rho^g \phi^t \Omega^t$.

A partir de la loi de Darcy, nous pouvons introduire le débit massique du fluide par unité de volume actuel $m_i^{w,t}$ et la variation de la masse fluide enfermée dans une masse donnée de squelette $\dot{M}^{w,t}$ ainsi que celle de la masse de gaz $\dot{M}^{g,t}$:

$$(1.10) \quad m_i^{w,t} = -\rho^{w,t} \kappa \frac{k_r^{w,t}}{\mu^w} \left(\frac{\partial p^{w,t}}{\partial x_i^t} + \rho^{w,t} g_i \right)$$

$$(1.11) \quad \dot{M}^{w,t} = \rho^{w,t} \left(\frac{\dot{p}^{w,t}}{k^w} S_r^{w,t} \phi^t + \dot{S}_r^{w,t} \phi^t - S_r^{w,t} \frac{\dot{\Omega}^t}{\Omega^t} \right)$$

$$(1.12) \quad \dot{M}^{g,t} = \rho^g \left(-(1 - S_r^{w,t}) \frac{\dot{\Omega}^t}{\Omega^t} - \dot{S}_r^{w,t} \phi^t \right)$$

avec κ la perméabilité intrinsèque, $k_r^{w,t}$ la perméabilité relative du fluide, k^w est le module de compressibilité et μ^w la viscosité dynamique du fluide.

L'équation de la conservation de la masse fluide dans sa forme faible est alors :

$$(1.13) \int_{\Omega^t} \left((\dot{M}^{w,t} + \dot{M}^{g,t}) p^{w*} - m_i^{w,t} \frac{\partial p^{w*}}{\partial x_i^t} \right) d\Omega^t = \int_{\Omega^t} Q^{w,t} p^{w*} d\Omega^t - \int_{\Gamma_q^t} \bar{q}^{w,t} p^{w*} d\Gamma^t$$

p^{w*} est le champ virtuel admissible de la pression du fluide, $q^{w,t}$ représente un flux supposé connu à la frontière et $Q^{w,t}$ est la source massique du fluide par unité de volume actuel.

Assumons maintenant que la configuration Ω^t au temps t en équilibre avec les conditions limites est connue, l'objectif est de trouver la nouvelle configuration à la fin du temps du pas ($\tau = t + \Delta t$). Nous supposons alors connaître une approximation de la configuration Ω^{τ_1} pour laquelle l'équilibre n'est pas atteint. Il est alors possible d'exprimer les résidus tels que :

$$(1.14) \quad \int_{\Omega^{\tau_1}} \left(\sigma_{ij}^{\tau_1} \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^{\tau_1}} + \Sigma_{ijk}^{\tau_1} \frac{\partial v_{ij}^*}{\partial x_k^{\tau_1}} \right) d\Omega^{\tau_1} - \int_{\Omega^{\tau_1}} \lambda_{ij}^{\tau_1} \left(\frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^{\tau_1}} - v_{ij}^* \right) d\Omega^{\tau_1} - \int_{\Gamma_\sigma^{\tau_1}} \rho^{mix,\tau_1} g_i u_i^* d\Omega^{\tau_1} - \int_{\Gamma_\sigma^{\tau_1}} (\bar{t}_i u_i^* + \bar{T}_i v_{ik}^* n_k) d\Gamma^{\tau_1} = R^{\tau_1}$$

$$(1.15) \quad \int_{\Omega^{\tau_1}} \lambda_{ij}^* \left(\frac{\partial u_i^{\tau_1}}{\partial x_j^{\tau_1}} - v_{ij}^{\tau_1} \right) d\Omega^{\tau_1} = S^{\tau_1}$$

$$(1.16) \quad \int_{\Omega^{\tau_1}} \left((\dot{M}^{w,\tau_1} + \dot{M}^{g,\tau_1}) p^{w*} - m_i^{w,\tau_1} \frac{\partial p^{w*}}{\partial x_i^{\tau_1}} \right) d\Omega^{\tau_1} - \int_{\Omega^{\tau_1}} Q^{w,\tau_1} p^{w*} d\Omega^{\tau_1} + \int_{\Gamma_q^{w,\tau_1}} \bar{q}^{w,\tau_1} p^{w*} d\Gamma^{\tau_1} = W^{\tau_1}$$

Puis après une linéarisation des équations, les équilibres sont obtenus grâce au schéma de Newton-Raphson. Enfin, les équations sont réécrites d'une façon matricielle afin de définir la matrice locale de raideur $[E]$ de l'élément. $[E]$ est une matrice 25 x 25.

$$(1.17) \quad [E^t] = \begin{bmatrix} E_{1(4 \times 4)}^t & 0_{(4 \times 2)} & K_{WM(4 \times 3)}^t & 0_{(4 \times 8)} & 0_{(4 \times 4)} & -I_{(4 \times 4)} \\ G_{2(2 \times 4)}^t & 0_{(2 \times 2)} & G_{2(2 \times 3)}^t & 0_{(2 \times 8)} & 0_{(2 \times 4)} & 0_{(2 \times 4)} \\ K_{MW(3 \times 4)}^t & 0_{(3 \times 2)} & K_{WW(3 \times 3)}^t & 0_{(3 \times 8)} & 0_{(3 \times 4)} & 0_{(3 \times 4)} \\ E_{2\tau^1(8 \times 4)} & 0_{(8 \times 2)} & 0_{(8 \times 3)} & D_{(8 \times 8)}^t & 0_{(8 \times 4)} & 0_{(8 \times 4)} \\ E_{3(4 \times 4)}^t & 0_{(4 \times 2)} & 0_{(4 \times 3)} & 0_{(4 \times 8)} & 0_{(4 \times 4)} & I_{(4 \times 4)} \\ E_{4(4 \times 4)}^t & 0_{(4 \times 2)} & 0_{(4 \times 3)} & 0_{(4 \times 8)} & -I_{(4 \times 4)} & 0_{(4 \times 4)} \end{bmatrix}$$

Discrétisation en éléments finis

Les éléments finis utilisés pour un milieu continu de second gradient sont des éléments quadrilatéraux non-conformes à huit nœuds pour la partie mécanique premier gradient (degrés de liberté en déplacement u_i), quatre nœuds pour la description de la mécanique second gradient (degrés de liberté sur la déformation microscopique v_{ij}), huit nœuds pour la description de la partie hydraulique (degrés de liberté en pression d'eau p_w et 1 nœud pour la description des multiplicateurs de Lagrange (assimilés à des degrés de liberté λ_{ij}). Nous obtenons alors l'élément parent représenté à la Fig.1.1 qui contient 44 degrés de liberté.

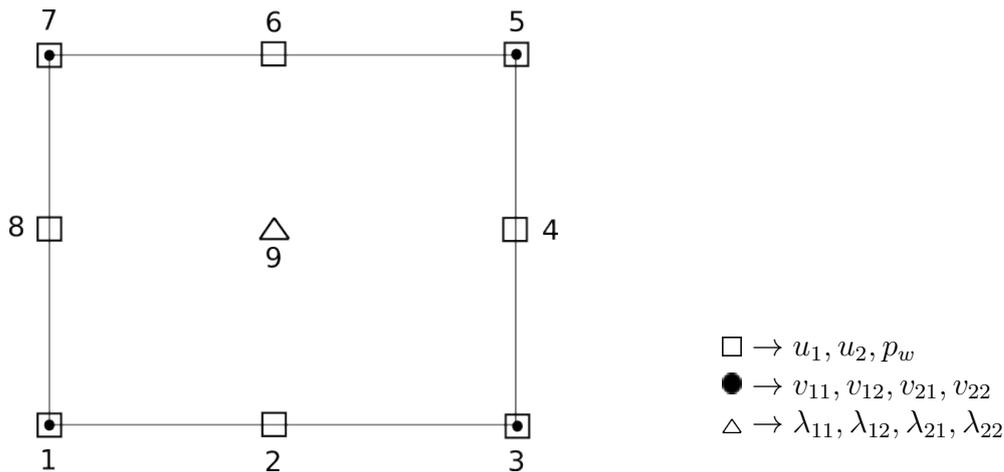


FIGURE 1.1 – Élément parent hydro-mécanique second gradient

1.2.2 Loi de comportement des matériaux

Comme nous l'avons vu, nous utilisons des milieux de second gradient locaux. L'un des atouts de cette formulation est de définir l'enrichissement du milieu de façon locale, c'est-à-dire au niveau de l'élément directement. Ainsi, les équations présentées ci-dessous restent valables pour toutes lois de comportement, ce qui rend aisé l'utilisation de l'une ou de l'autre.

Dans le cadre des études sur la non-unicité des solutions, nous avons utilisé deux grandes familles de lois de comportement pour la partie premier gradient. Ces lois de comportement sont usuellement utilisées pour modéliser le comportement adoucissant des géomatériaux : de type Von Mises d'une part et de type Drucker-Prager d'autre part. La loi de comportement de type de Von Mises est tout d'abord utilisée pour sa simplicité. La non linéarité du modèle est introduite en considérant le matériau comme incompressible et non sensible dans sa formulation à la contrainte moyenne. Le principal avantage de cette loi de comportement est d'être "simple" en terme de déclenchement de la localisation car elle présente une discontinuité de pente sur

la courbe contrainte-déformation avec radoucissement. Après une première exploitation, il m'a paru important de commencer à s'orienter vers des lois de comportement plus réalistes que celle utilisée jusqu'à présent. J'ai alors utilisé un modèle de comportement élasto-plastique avec une surface d'écoulement de type Drucker-Prager écrouissable sur l'angle de frottement et sur la cohésion en fonction de la déformation de cisaillement plastique équivalente. Cette loi de comportement permet de tenir compte à la fois de la contrainte moyenne mais aussi du déviateur des contraintes. Nous l'avons ensuite modifié pour tenir compte de l'anisotropie du matériau (de façon transversale élastique).

Concernant la loi de comportement de la partie second gradient (découplée de celle de la partie premier gradient), elle est choisie de façon très simple. C'est un cas particulier de celle proposée par Mindlin [1964]. Elle est isotrope linéaire :

$$(1.18) \quad \begin{bmatrix} \nabla \\ \Sigma_{111} \\ \nabla \\ \Sigma_{112} \\ \nabla \\ \Sigma_{121} \\ \nabla \\ \Sigma_{122} \\ \nabla \\ \Sigma_{211} \\ \nabla \\ \Sigma_{212} \\ \nabla \\ \Sigma_{221} \\ \nabla \\ \Sigma_{222} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & 0 & 0 & D/2 & D/2 & 0 \\ 0 & D/2 & D/2 & 0 & -D/2 & 0 & 0 & D/2 \\ 0 & D/2 & D/2 & 0 & -D/2 & 0 & 0 & D/2 \\ 0 & 0 & 0 & D & 0 & -D/2 & -D/2 & 0 \\ 0 & -D/2 & -D/2 & 0 & D & 0 & 0 & 0 \\ D/2 & 0 & 0 & -D/2 & 0 & D/2 & D/2 & 0 \\ D/2 & 0 & 0 & -D/2 & 0 & D/2 & D/2 & 0 \\ 0 & D/2 & D/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{v}_{11}}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \dot{v}_{11}}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \dot{v}_{12}}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \dot{v}_{12}}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \dot{v}_{21}}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \dot{v}_{21}}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \dot{v}_{22}}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \dot{v}_{22}}{\partial x_2} \end{bmatrix},$$

où \dot{v}_{ij} est le taux des déformations microscopiques v_{ij} et $\nabla \Sigma_{ijk}$ est la dérivée de Jaumann de la double contrainte afin d'obtenir une dérivée objective en grandes déformations.

1.2.3 Perte de l'unicité des solutions

D'un point de vue théorique, le théorème de Hill (cf. Hill [1978]) peut être utilisé pour prouver l'unicité de la solution en mécanique pure d'un problème aux conditions limites. Cependant, l'utilisation d'un modèle numérique et d'une loi de comportement adoucissante ne permet pas d'assurer l'unicité des solutions et les milieux de second gradient ne permettent pas de s'affranchir de cette difficulté (Chambon et Moullet [2004]). En effet, les méthodes numériques nécessitent l'utilisation d'un algorithme de résolution, tel que celui de Newton-Raphson. Or si la loi de comportement est adoucissante, l'algorithme de résolution ne conduit pas à une solution unique puisque cette dernière dépendra du pas de temps utilisé pour la résolution ou la valeur utilisée pour l'initier. La figure 1.2 montre que, suivant le choix de la valeur initiale $x^{n=0}$ l'algorithme de Newton-Raphson arrive à trouver les différentes racines d'une fonction à une variable $y = f(x)$.

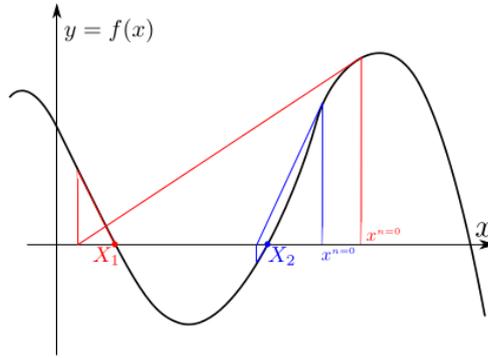


FIGURE 1.2 – Algorithme de Newton-Raphson pour une fonction à une variable $y = f(x)$

Pour les milieux de second gradient, la non unicité des solutions a été démontrée par [Matsushima et al. \[2002\]](#), [Chambon et Moulet \[2004\]](#) et [Bésuelle et al. \[2006\]](#) dans le cas d'un modèle en mécanique pure et pour un problème à une dimension (une barre) ou à deux dimensions (bi-axial). Dans ces travaux initiaux, les différentes solutions sont obtenues par l'utilisation d'un champ aléatoire de l'initialisation des vitesses à partir duquel le problème numérique initialise les degrés de liberté à la première itération.

$$(1.19) \quad x_j^{n^{i=1}} = x_j^{n-1} + v_j^{\text{aléa}} \Delta t$$

Dans la même philosophie, nous avons montré la non-unicité des solutions pour des modèles moins simple et des problèmes rencontrés par les industriels. Cependant, nous avons remplacé l'utilisation d'un champ aléatoire des vitesses, peu pratique et peu efficace pour trouver certaines solutions ayant un faible bassin d'attraction¹, par l'utilisation de discrétisations temporelles différentes.

$$(1.20) \quad x_j^{n^{i=1}} = x_j^{n-1} + v_j^{n-1} \Delta t$$

Ainsi, nous nous retrouvons dans la résolution classique d'un problème numérique, où sans l'utilisation d'un artefact comme le choix aléatoire des vitesses de l'initialisation du pas, nous "testons" différents pas de temps pour résoudre un même problème. Or, chaque numéricien fait un choix au niveau de la discrétisation temporelle afin de mener à bien la résolution d'un problème, choix habituellement réalisé sans conscience de son potentiel impact sur l'émergence d'une solution parmi d'autre.

1.2.4 Non unicité des solutions : quelques exemples

Mécanique pure

Le problème traité correspond à celui d'un creusement d'une cavité, problème courant dans la géotechnique pétrolière ou pour le stockage en profondeur. La zone étudiée est prise suffisamment large afin de s'assurer que l'extrémité extérieure ne soit pas perturbée par le creusement (i.e. par les conditions limites imposées à l'extrémité extérieure). L'état initial de compression est homogène et isotrope. Le creusement consiste à modéliser la diminution de la pression interne de la cavité de la contrainte initiale à la valeur de 0.

1. Rappelons que le bassin d'attraction d'une solution est, dans l'espace des initialisations possibles, l'ensemble des initialisation conduisant à cette solution

Sans prendre en compte la présence d'un fluide dans le milieu, nous avons montré que les milieux de second gradient permettaient bien d'obtenir des solutions objectives par rapport à la discrétisation spatiale choisie (i.e. le maillage). En effet, la zone de plastification dans le cas d'une solution axisymétrique est identique pour 3 maillages distincts (Fig. 1.3). Une autre solution à la Fig. 1.4, comportant des bandes de déformations localisées, montre aussi l'objectivité des solutions.

L'index plastique est un marqueur de plasticité à chaque point de Gauss des éléments de

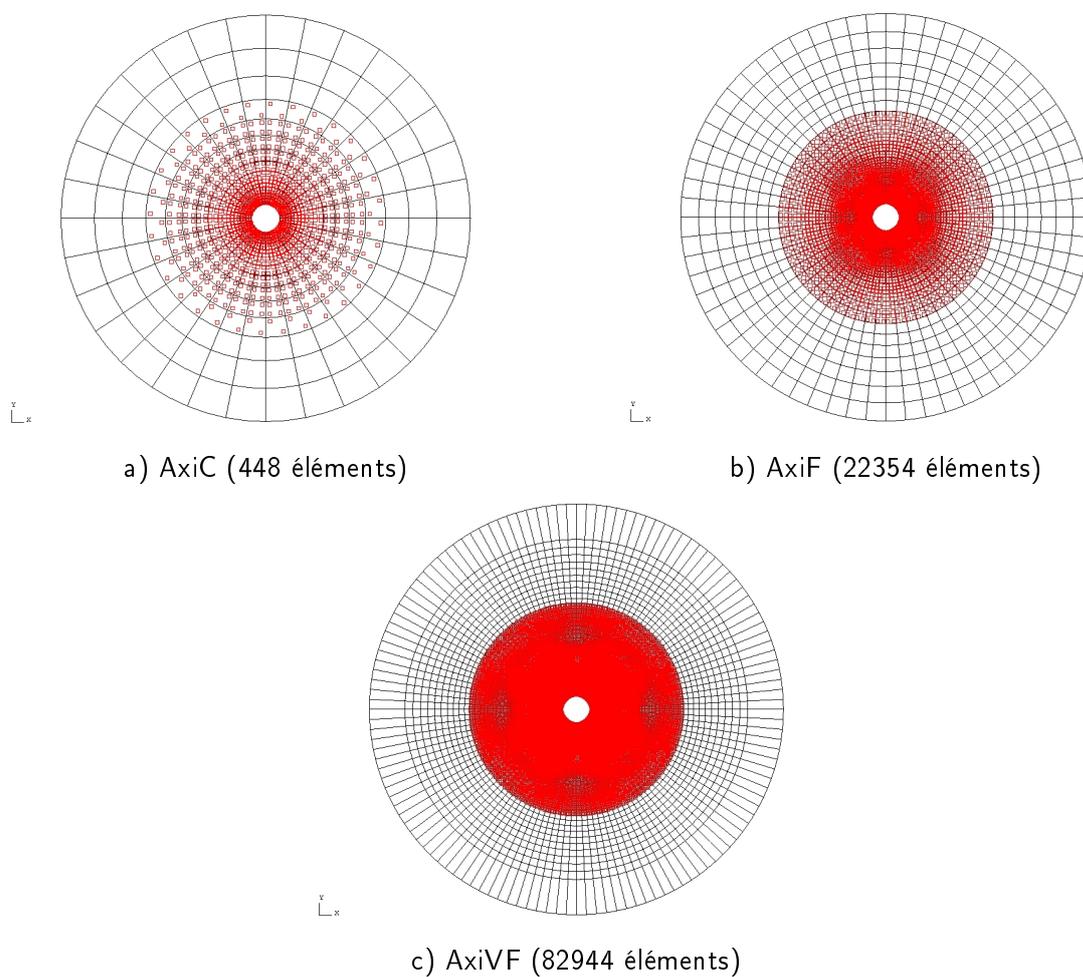


FIGURE 1.3 – Index plastique pour les solutions axisymétriques

second gradient utilisés. Un carré rouge est imprimé lorsque le point est en charge plastique. Rien n'est imprimé lorsque le point de Gauss est en charge ou en décharge élastique.

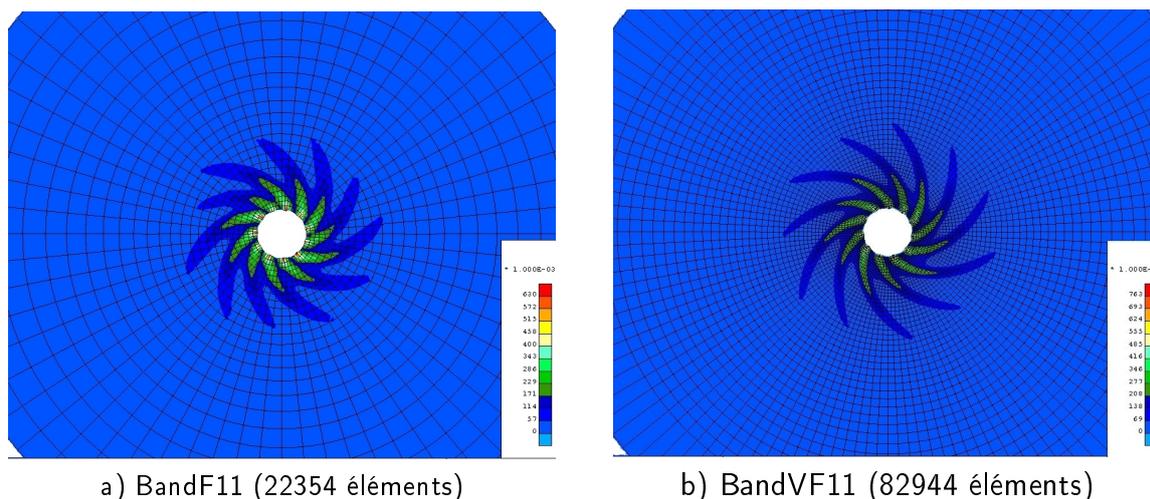


FIGURE 1.4 – Second invariant des déformations pour des solutions localisées

La Fig. 1.4 fait apparaître le même nombre de bandes de localisation (11), la même largeur de bandes et la même propagation pour 2 maillages différents. La Fig. 1.5 présente les résultats des deux maillages de façon superposés. La Fig. 1.5a) permet d'affirmer que les bandes ont bien la même largeur et celle Fig. 1.5b) que la propagation est identique. L'utilisation du second invariant des déformations comme indicateur des bandes de localisation est à utiliser avec précaution car les isovaleurs semblent indiquer une propagation plus importante sur le maillage le plus fin alors que le mécanisme de charge plastique ne se propage pas plus.

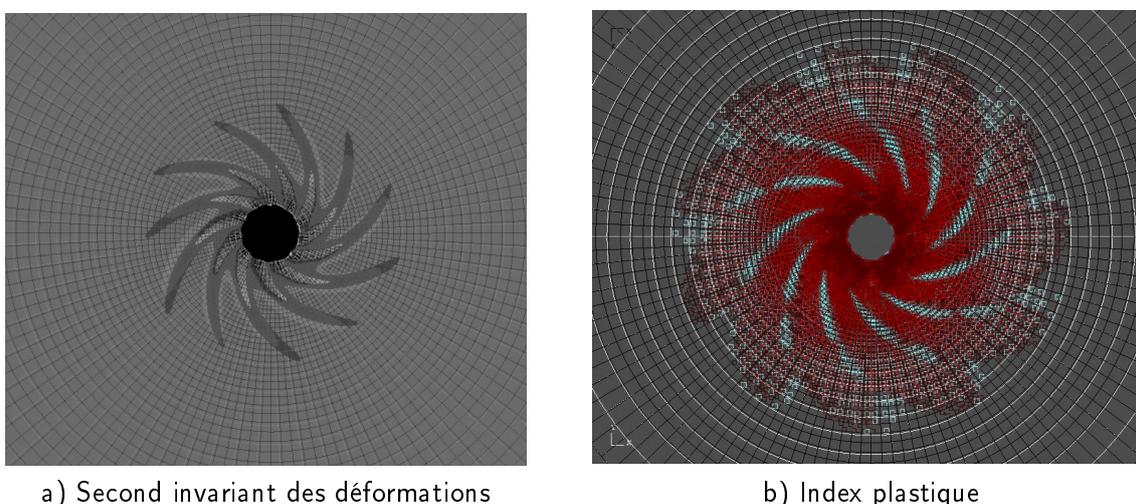


FIGURE 1.5 – Superposition des réponses pour les deux maillages

Nous venons de prouver que l'objectivité des solutions par rapport au maillage utilisé était obtenu avec un modèle de second gradient. Nous avons ensuite recherché à faire apparaître différents types de solutions. Dans un premier temps, nous avons montré qu'il existait un grand nombre de solutions où le pattern de localisation était des spirales. La Fig. 1.6a) et b) en montre deux exemples. C'est deux solutions sont en réalité les mêmes car le nombre de bandes est identique et qu'elles peuvent être obtenues par symétrie de révolution (avec ou sans changement d'orientation des spirales). Par contre, les deux solutions obtenues avec le maillage le plus fin des Fig. 1.4b) et 1.7a) sont bien différentes car le nombre de bandes l'est (11 et 12 bandes). De plus, d'autres solutions, hors spirales, sont aussi obtenues, celles ayant des bandes croisées (Fig. 1.6c) et 1.7b)). Il est important de préciser que toutes ces solutions

exhibées par notre modélisation numérique sont obtenues avec des critères de convergence très exigeants : à la fois sur le résidu des déplacements (précision de 2.10^{-5}) et celui des forces (précision de 2.10^{-7}).

Ces deux types de pattern de localisations existent dans la nature et ont été obtenus lors d'essais expérimentaux (Fig. 1.8).

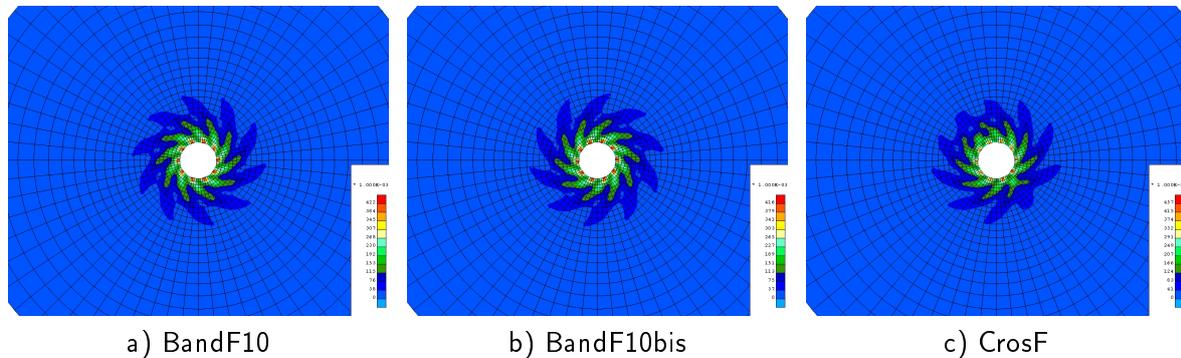


FIGURE 1.6 – Second invariant des déformations : autres solutions avec le maillage fin (22354 éléments)

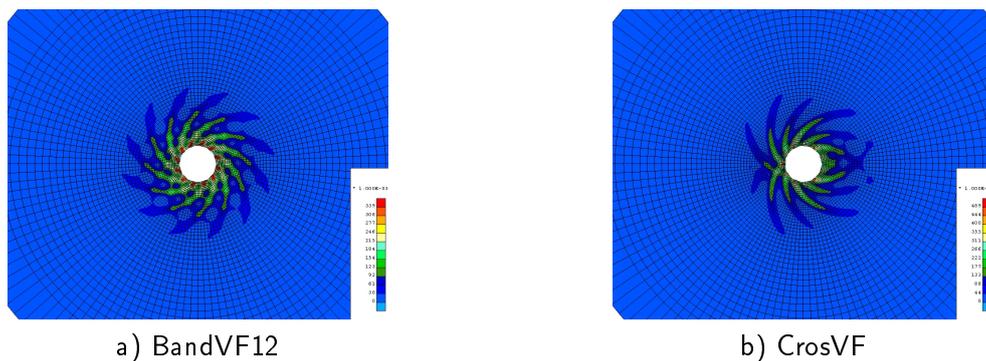
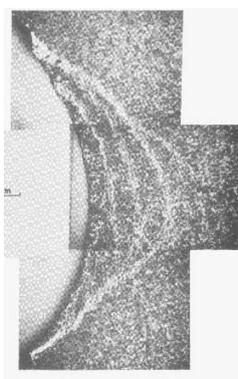


FIGURE 1.7 – Second invariant des déformations : autres solutions avec le maillage très fin (82944 éléments)



a) D'après Ewy et Cook [1990]



b) D'après Van den Heek [2001]

FIGURE 1.8 – Résultats expérimentaux montrant des bandes de localisation en spirale et conjuguées

Hydro-mécanique

L'objectif de ce travail est de démontrer la perte d'unicité des solutions sur un modèle numérique simulant le creusement dans une roche argileuse pouvant accueillir le stockage de déchets en profondeur. Afin de simuler cette problématique industrielle, nous avons choisi d'utiliser pour la partie premier gradient une loi de comportement constitutive plus réaliste que celles de l'étude précédente. Nous utilisons ici une loi de comportement de type Druker-Prager prenant en compte dans la partie élastique de l'anisotropie transversale pour la partie mécanique du matériau et le couplage entre un fluide et la partie solide, le tout dans un milieu de second gradient. Ce travail a été effectué dans le cadre du projet européen Timodaz qui avait pour objectif d'étudier la zone d'endommagement d'excavation créée lors du forage de tunnel dans les couches géologiques profondes. Les paramètres utilisés correspondent à l'argile de Boom Clay.

Le schéma de chargement est lui aussi plus réaliste puisqu'il se décompose en 2 phases :

- une phase de creusement qui correspond à la chute des contraintes totales et de la pression d'eau au niveau de la cavité interne,
- une phase de stabilisation qui consiste à conserver comme constant les conditions limites du problème après la fin du creusement et de laisser le temps s'écouler. Cela correspond à la dissipation de la pression de l'eau dans le milieu qui doit à terme se stabiliser.

Une vingtaine de calculs est menée pour faire apparaître différentes solutions lors de la résolution numérique du même problème correspondant à la phase 1 (creusement). A chaque calcul, seule la discrétisation temporelle est différente au niveau des pas de calcul. Le maillage est cette fois-ci conservé constant. Ne connaissant pas le nombre de solutions plausibles, nous ne prétendons pas les avoir obtenues toutes. Entre toutes les solutions comportant des bandes de déformations localisées, nous en choisissons 4 (Fig. 1.9) qui semblent être les plus significatives pour le problème étudié. La prise en compte de l'anisotropie et la présence d'un fluide ne permettent pas de restaurer l'unicité des solutions bien que les solutions soient guidées par l'anisotropie.

Outre l'importance de montrer qu'il n'y a pas une solution unique à ce type de problème, la déformation de la cavité intérieure n'est pas non plus unique, signifiant que l'endommagement en surface du tunnel à la fin du creusement peut être de différentes natures (Fig. 1.10). Puis nous simulons la phase de stabilisation. Les incréments de pression d'eau se dissipent dans le milieu. Nous ne cherchons pas de nouvelle solution ici (ce qui serait aussi possible) mais nous nous contentons de comparer l'évolution des zones localisées des solutions obtenues à la phase 1 après un temps de stabilisation de 45000s pour un cylindre creux de 43 mm. La Fig. 1.11 prouve bien que le temps de stabilisation ne permet pas non plus de restaurer l'unicité des solutions malgré la dissipation des incréments de pression d'eau dans le milieu.

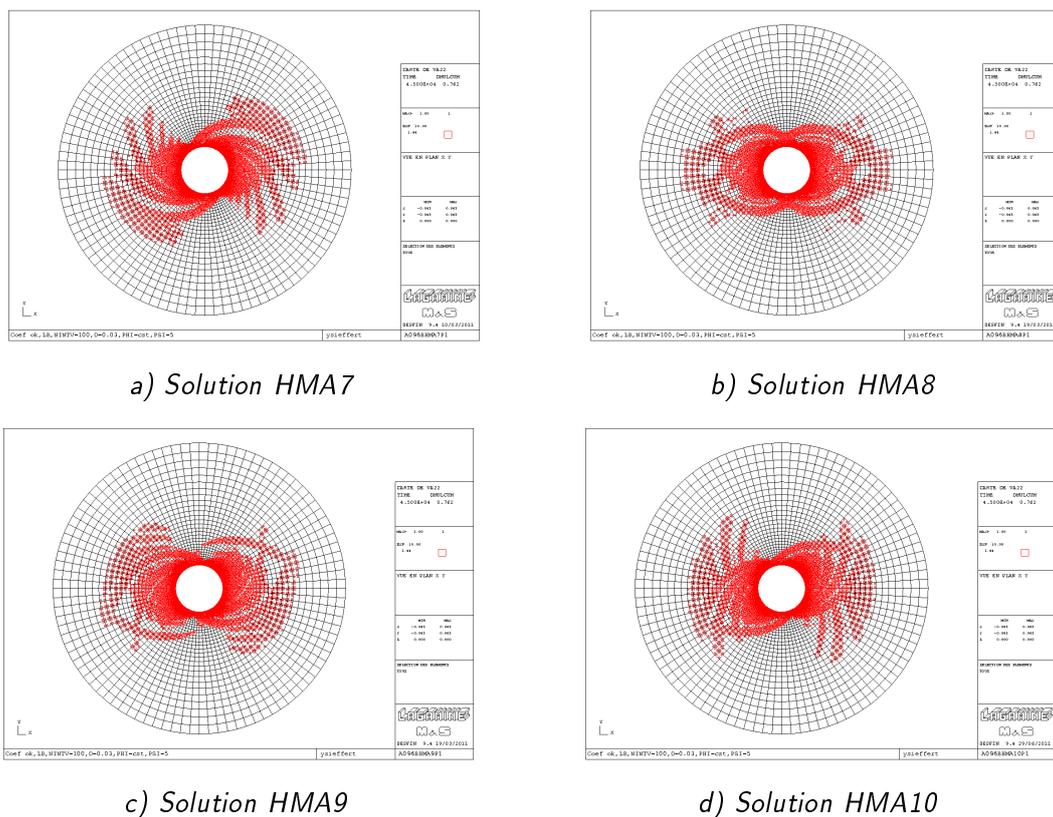


FIGURE 1.11 – L'index plastique à la fin de la phase de stabilisation

La question qui se pose maintenant, en particulier pour les industriels, est la conséquence de cette non-unicité et la nécessité ou non de l'étudier de façon systématique. Certaines solutions reflètent-elles un endommagement plus important que d'autre, conduisant à une perméabilité différente du milieu ? Il faudra réaliser des recherches plus approfondies pour pouvoir donner une réponse ferme. Cependant, nous pouvons déjà répondre de façon partielle.

Tout d'abord, rappelons ici que nous nous contentons de prouver l'unicité des solutions mais que nous n'avons aucun moyen de prétendre que nous avons étudié l'ensemble des solutions. Théoriquement, le nombre de solution est infini. Numériquement, il est fini puisque nous utilisons un nombre fini d'éléments et de pas de temps. Cependant, il serait intéressant d'étudier le bassin d'attraction des solutions obtenues afin de connaître la probabilité de chacune. Ceci aiderait à définir un nombre d'essais numériques minimaux afin de s'assurer d'obtenir les plus fréquentes et d'avoir donc un échantillon de réponses numériques représentatifs.

Cependant, nous pouvons déjà mettre en lumière que la déformation de la cavité n'est pas identique suivant les solutions et cela même après la phase de stabilisation (Fig. 1.12). La

comparaison de ces résultats avec une image tomographique du même essai expérimental (Labiouse *et al.* [2014]) montre que parmi les 4 solutions concernées dans cette étude, 2 pourraient correspondre à cet essai expérimental. Par contre, l'unicité n'existe pas non plus expérimentalement (Desrues et Viggiani [2004]), donc les autres solutions sont susceptibles d'exister aussi dans la nature.

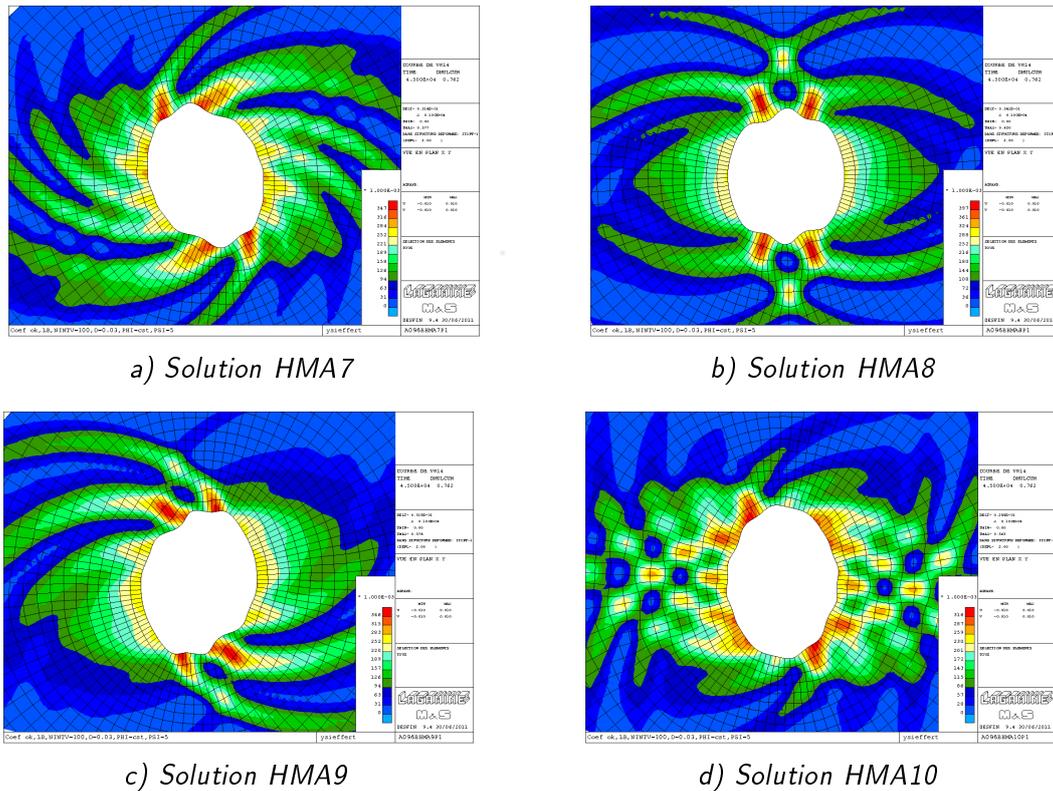


FIGURE 1.12 – Second invariant des déformations à la fin de la phase de stabilisation

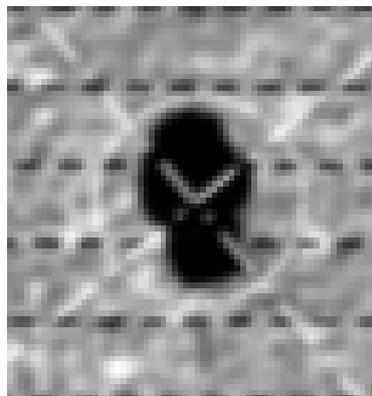
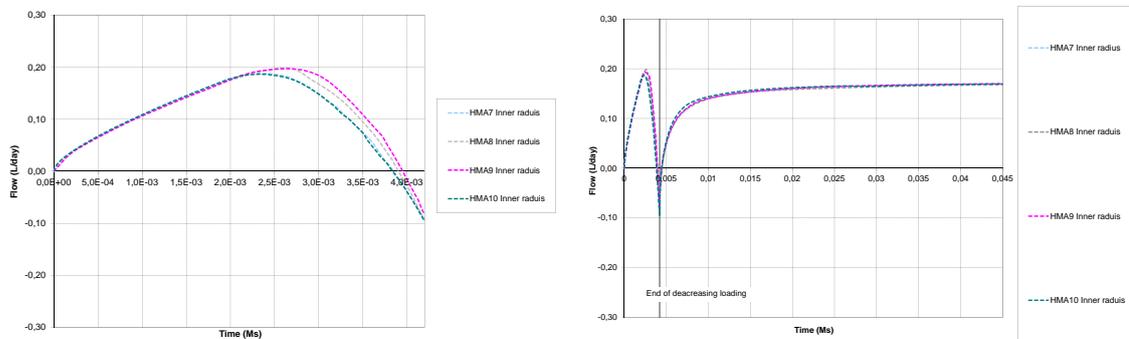


FIGURE 1.13 – Résultat expérimental d'après Labiouse *et al.* [2014]

La Fig. 1.14a) montre que les solutions obtenues à la fin du creusement conduisent à des débits d'eau sortant de la cavité interne légèrement différents. La non unicité des solutions a donc un impact sur la perméabilité du milieu. Cependant, après la phase de stabilisation, les débits

d'eau sortant sont sensiblement identiques. Finalement, lorsque les incréments de pression sont diffus, les différents types de localisation que nous obtenons n'ont plus de conséquences sur les débits sortants. Ainsi, la sécurité d'une installation de stockage en profondeur ne semble pas impactée par l'obtention d'une solution par rapport à une autre.



a) Phase de creusement

b) Phase de creusement et de stabilisation

FIGURE 1.14 – Débit d'eau sortant de la cavité interne

Multi-phasique : solide, fluide et gaz, le phénomène de cavitation

Dans cette partie, nous nous intéressons à la prise en compte de la dilatance du matériau qui est l'une des propriétés usuellement rencontrées dans les géomatériaux. Pour l'argile de Boom Clay, suivant les données de la bibliographie (François *et al.* [2009] et Bernier *et al.* [2007]), cette dilatance est comprise entre 0 et 10°. Cependant, la prise en compte de cette propriété du matériau conduit à une difficulté : l'obtention d'une troisième phase dans le matériau. En effet, dans un matériau comme l'argile de Boom Clay, la perméabilité est très faible (aux alentours de $\kappa = 10^{-12}$ m/s). L'eau contenue dans un élément est en quelque sorte "bloquée" dans l'élément car le mouvement d'eau entre les éléments sont très faibles. Ainsi, la prise en compte de la dilatance conduit à l'obtention d'une diminution de pression dans les zones en charge plastique du matériau. Elle peut alors devenir négative et se transformer en vapeur lorsque la pression d'eau atteint la valeur de cavitation (au alentour de -100 kPa pour l'eau).

L'étude présentée ici consiste à modéliser un essai biaxial non-drainé en utilisant un milieu de second gradient afin d'étudier le régime post-localisé. La prise en compte de la phase vapeur est ici introduite par une loi de désaturation en fonction de la pression d'eau. Au début de l'essai, l'échantillon est considéré comme saturé en eau.

Pour la partie mécanique, la loi de comportement utilisée est celle présentée plus haut : élasto-plastique avec une surface d'écoulement de type Drucker-Prager écrouissable avec un seul mécanisme, soit une conservation constante de l'angle de frottement et une diminution de la cohésion en fonction de la déformation de cisaillement plastique équivalente.

L'étude de la non-unicité des solutions prend ici tout son sens car suivant la solution que nous arrivons à obtenir pour un même problème, les conclusions peuvent être opposées. La Fig. 1.15 présente deux réponses différentes pour le même problème aux limites. Tous les paramètres mécaniques et hydriques sont parfaitement identiques. La même méthode est utilisée pour obtenir les deux solutions présentées : seule la discrétisation temporelle est modifiée dans la partie élastique du chargement initial, ce qui conduit à une initialisation du régime plastique pour des pas de chargements différents. Comme nous l'avons déjà souligné précédemment, la

solution homogène en plasticité est une des solutions à tout problème initialement homogène (Fig. 1.15a)). Cependant, numériquement, cette solution est plus difficile à obtenir que les solutions localisées, qui se déclenchent plus aisément lors de la résolution numérique du fait de la précision des calculs qui nécessitent une troncature (quinze chiffres significatifs en Fortran avec une double précision). L'entrée en plasticité de façon homogène conduit à une diminution homogène de la pression interstitielle due à la dilatance du matériau. De façon aussi homogène, la contrainte effective augmente et deux phénomènes en compétition prennent place : d'une part l'adoucissement du matériau et d'autre part l'augmentation de la pression de confinement due à l'augmentation de la contrainte effective. Pour la solution homogène, la diminution de la pression d'eau qui équivaut à une augmentation de la pression de confinement est prépondérante. Ceci conduit à une augmentation de la contrainte totale. Cependant ce processus s'arrête lorsque la pression d'eau atteint la pression de cavitation : la pression d'eau se stabilise à la pression de cavitation et la contrainte totale se met à décroître. Il est important de noter que la localisation apparaît exactement au même moment où la pression de cavitation de l'eau est atteinte.

La Fig. 1.15b) présente une solution où l'entrée en plasticité de l'échantillon est localisée. Le mécanisme plastique et donc le comportement adoucissement de la loi est activé dans la bande ce qui conduit à une diminution des contraintes totales. Les éléments qui sont en dehors de la bande sont alors en décharge plastique. La dilatance qui se développe dans la bande localisée produit une diminution de la pression d'eau dans la bande. Dans les éléments hors de la bande mais à son voisinage immédiat, la pression d'eau chute aussi pour deux raisons. La première est que l'activation de la bande localisée conduit à une diminution globale des efforts appliqués à l'échantillon donc une diminution de la pression d'eau. La deuxième est que la pression d'eau dans les éléments de la bande chute plus vite que dans les éléments à l'extérieur de la bande, provoquant un gradient de pression et donc un flux d'eau (très faible dû à la perméabilité du milieu) allant de l'extérieur à la bande à l'intérieur, ce qui fait diminuer la pression d'eau à l'extérieur de la bande. Ainsi la diminution de la pression d'eau se propage dans l'échantillon. Cette diminution de la pression d'eau dans les éléments en dehors de la bande mais à son voisinage immédiat conduit à une augmentation des contraintes effectives pour ces éléments. Ils passent d'un état en décharge élastique à un état en charge élastique. D'un point de vue macroscopique, une augmentation globale apparente des forces de réactions est alors observée. Le terme "augmentation globale apparente" est employé ici car la diminution de la cohésion est toujours prépondérante dans les éléments dans la bande localisée. Finalement, lorsque la pression d'eau atteint la valeur de cavitation, cette dernière se stabilise à cette valeur, entraînant les contraintes effectives à un comportement similaire. Les forces de réactions diminuent aussi puisque les éléments en dehors de la bande sont en décharge élastique et que ceux dans la bande sont en charge plastique adoucissante.

En conclusion, lorsque la solution numérique du problème rentre dans le domaine plastique de façon homogène, la cavitation entraîne la localisation alors que lorsque la solution rentre de façon localisée dans le domaine plastique, la cavitation a lieu plus tard et joue un rôle dans le maintien de la solution localisée mais non dans son déclenchement. Cet exemple illustre de façon parfaite l'impact des solutions numériques obtenues sur les conclusions qui peuvent être réalisées et qui sont en fait réalisées sur une solution donnée et non pas sur les solutions possibles. Dans certain cas, l'étude de la non-unicité des solutions est nécessaire afin d'obtenir des conclusions globales.

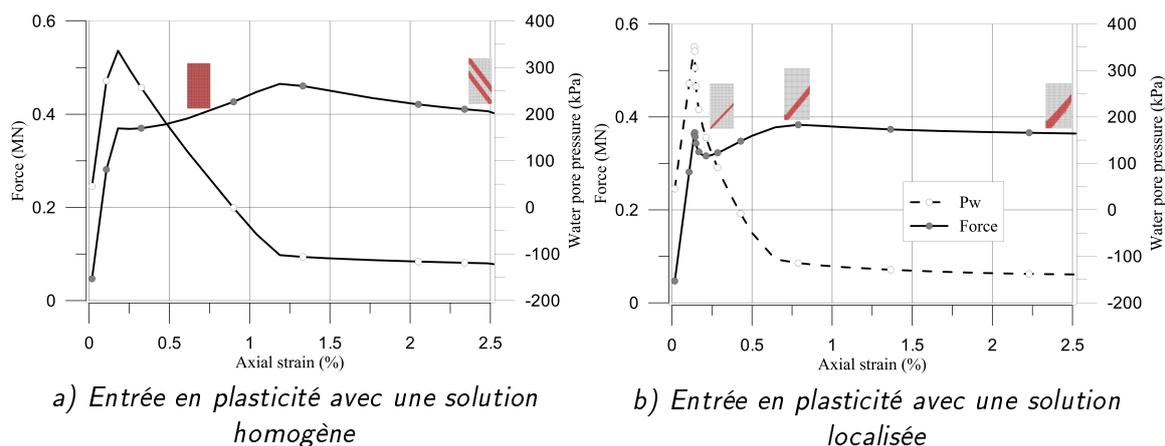


FIGURE 1.15 – Évolution de deux solutions dont l'initiation de la plasticité est différente
 Les figures montrent l'index de plasticité dans l'échantillon. Paramètres des calculs : $\psi = 10^\circ$, $\kappa = 10^{-12} m/s$ et $\dot{\epsilon} = 1.8 \times 10^{-4} \%/h$

1.3 Conclusion et perspectives

Nous avons montré dans ce chapitre que les modèles locaux de second gradient permettaient de restaurer l'objectivité des solutions par rapport à la discrétisation spatiale utilisée et cela même dans le régime post-localisé d'un problème aux conditions limites. Cependant, comme pour tout problème de bifurcation, l'unicité de la solution n'est pas restaurée. D'un point de vue industriel, cette difficulté est souvent peu abordée et en tout cas jamais traitée. Au niveau académique, la non-unicité des solutions est bien connue mais souvent non considérée. L'objectif de mon travail a donc été d'investir ce champ de recherche et de montrer que cette non-unicité existait sur différents types de modélisation que cela soit en mécanique pur ou en hydromécanique. Cet aspect théorique et numérique permet aussi de modéliser la perte de reproductibilité expérimentale des essais de laboratoire lors de la présence de déformation hétérogène.

De plus, j'ai montré dans le cas particulier de la cavitation dans un sol que suivant la solution convergée du modèle, les conclusions apportées pouvaient être totalement différentes. Ceci a montré la nécessité de rechercher différentes solutions afin de pouvoir apporter des conclusions générales et non basées sur le résultat d'une solution ayant été obtenue de façon aléatoire par les choix (habituellement non conscient) du pilotage du calcul.

Cependant, ce travail doit être poursuivi afin de mieux connaître la probabilité d'une solution plutôt qu'une autre, que cela soit lié à son bassin d'attractivité numérique ou contraint par des réalités naturelles d'apparaître in-situ.

Chapitre 2

Analyse de la vulnérabilité sismique des constructions traditionnelles

2.1 Introduction et objectifs

L'étude de la vulnérabilité des structures est un thème majeur abordé au laboratoire 3SR par l'équipe Risques, Vulnérabilité des structures et comportement mécanique des matériaux (RV). Classiquement, les recherches sur la vulnérabilité concernent les structures en béton, dues à des problématiques industrielles d'ouvrages sensibles (barrage, centrale nucléaire, pont, etc). Parallèlement, mais de façon plus récente, cette activité de recherche s'est ouverte à la vulnérabilité des structures en ossature bois de type "moderne"¹, c'est-à-dire nécessitant un procédé industriel (panneaux OSB², bois-lamellé-collé, etc.).

En 2010, j'ai initié dans l'équipe RV la thématique de la vulnérabilité des constructions de types "traditionnelles" en lien avec le laboratoire CRAterre de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (ENSAG). Depuis plusieurs années, j'avais développé une collaboration entre l'ENSAG et l'UGA (UJF à l'époque) orientée initialement vers la pédagogie et le mélange interdisciplinaire d'étudiants. En 2010, grâce à l'obtention de l'ANR ReparH dans le cadre d'un appel à projet Flash Haïti cette collaboration s'est enrichie de la dimension recherche. Depuis, cette collaboration est particulièrement active et s'est concrétisée à travers différents projets pour la reconstruction post-sinistre dont les éléments les plus significatifs sont présentés ci-dessous.

La (re)construction utilisant les cultures constructives locales nécessite un changement de paradigme au niveau du génie parasismique. En effet, il ne s'agit plus de construire le plus "solidement" possible mais de proposer des solutions, à la fois soutenables dans le contexte économique local, et parasismiques par l'utilisation et l'optimisation de dispositifs traditionnels de dissipation d'énergie. Cette exigence requiert au préalable la compréhension précise du fonctionnement des cultures constructives locales : rôles des différents éléments constitutifs de la construction, que cela soit en termes de mise en œuvre, d'usage, d'esthétisme ou de dissipation d'énergie. L'objectif est ici triple :

- proposer des modèles constructifs en lien avec les pratiques traditionnelles afin d'assurer à la fois leur appropriation par les habitants, l'autonomie des populations dans leur (re)construction et aussi la conservation de leur identité et leur culture en leur

1. Dans ce document, le mot "moderne" s'oppose au terme "traditionnel" sans connotation positive ou négative

2. Oriented Strand Board : panneau de lamelles orientées

(re)donnant conscience de la richesse et de l'ingéniosité de leur principe constructif traditionnel. Bien évidemment, cela va à l'encontre de l'uniformisation et des méfaits de la mondialisation qui consistent à proposer une solution unique et non adaptée au contexte sociaux-économique et aux savoirs faire locaux. Nous y reviendrons pas la suite au chapitre 3.

- être capable d'estimer la vulnérabilité des cultures constructives locales qui proviennent d'un long processus empirique d'observation de ce qui a conduit à la ruine ou non à chaque événement de catastrophe naturelle. Or du fait de la grande diversité des cultures constructives et de leur architecture vernaculaire, elles ne bénéficient pas pour leur conception et leur réalisation, ni d'un cadre administratif légal, ni de méthodes de calculs réglementaires. Nos travaux de recherche sont d'ordre expérimental et numérique afin de développer des méthodes de calcul adaptées à ces constructions et ainsi étudier leur vulnérabilité.
- optimiser les dispositifs constructifs afin de réduire la vulnérabilité sismique tout en prenant en compte la partie ethnologique et économique de la construction.

Mais évidemment les projets de (re)construction ne peuvent être limités à la seule étude de la vulnérabilité des structures. Il est tout aussi important d'accompagner la reconstruction en développant des formations, des actions de conseils, parfois des filières de matériaux mais aussi de la vulgarisation sur le terrain. En clair, il faut réussir à faire travailler ensemble chercheurs et membres d'ONG pour développer une recherche-opérationnelle, utile et efficace pour la reconstruction. Une telle démarche est doublement difficile car d'une part elle nécessite un travail interdisciplinaire entre chercheurs des sciences humaines et sociales (SHS) et sciences et technologies de l'ingénieur (STI) et d'autre part elle nécessite une interaction entre recherche académique et projet de reconstruction opérationnelle. Cette partie sera analysée dans le chapitre suivant. Le présent chapitre se focalisera sur la vulnérabilité structurelle des cultures constructives locales.

Thèses associées à ce chapitre

Florent Vieux-Champagne, "Analyse de la vulnérabilité sismique des structures à ossature en bois avec remplissage", thèse de l'Université de Grenoble, soutenue le 5 décembre 2013.

- Co-encadrants : Laurent Daudeville (33%), Stéphane Grange (33%) et Yannick Sieffert (33%)
- Sujet de recherche : l'objectif de cette thèse était de développer une méthode multi-échelles permettant de modéliser le comportement d'une structure en ossature bois avec remplissage de pierre et mortier de terre sous une sollicitation sismique. 4 échelles ont été étudiées et des campagnes expérimentales et numériques ont été menées à chaque échelle : l'échelle de la connexion, l'échelle de la cellule élémentaire, l'échelle du mur et finalement l'échelle de la maison. L'un des éléments marquant de cette thèse est la réalisation d'un essai expérimental à échelle 1 sur la table vibrante du FCBA de Bordeaux qui nous a permis de prouver scientifiquement la capacité de résilience de cette technique constructive, particulièrement adéquate à la reconstruction d'Haïti après le séisme de 2010. D'un point de vue local en Haïti, le travail de thèse de Florent Vieux-Champagne a conduit à l'obtention d'une accréditation de ce mode constructif par le ministère des travaux publics, transports et communications d'Haïti.

Hussein Ali Al-Gusab, "Modélisation fine des structures en bois avec remplissage", thèse en cours et ayant commencé le 1 septembre 2013.

- Co-encadrants : Laurent Daudeville (33%), Stéphane Grange (33%) et Yannick Sieffert (33%)

- **Sujet de recherche** : l'objectif de cette thèse, qui est actuellement dans sa troisième année, est d'améliorer les modélisations effectuées lors de la thèse de Florent Vieux-Champagne pour prendre en compte le comportement non-linéaire hystérétique de cette typologie de bâtiment. Actuellement, nous développons un nouveau macro-élément en utilisant l'ensemble des résultats expérimentaux accumulés ces dernières années afin d'obtenir une modélisation plus fine du comportement réel de la structure.

Publications associées à ce chapitre

[Vieux-Champagne et al. \[2014\]](#) → VIEUX-CHAMPAGNE, Y. SIEFFERT, S. GRANGE, L. DAUDEVILLE, A. POLASTRIB, A. CECCOTTI «Experimental analysis of seismic resistance of a filled wood structure», *Engineering & Structures*, vol. 69, 2014, pp 102-115.

[Vieux-Champagne et al. \[2016\]](#) → VIEUX-CHAMPAGNE, Y. SIEFFERT, S. GRANGE, C. BELINGA NKO'O, J.C. DUCCINI, C.FAYE, L. DAUDEVILLE «Experimental analysis of a shake table test of a timber-framed structures with stones and earth», *Earthquake Spectra*, under review with minor modification.

[Sieffert et al. \[2016\]](#) → Y. SIEFFERT, VIEUX-CHAMPAGNE, S. GRANGE, P. GARNIER, J.C. DUCCINI, L. DAUDEVILLE «Full-field measurement with a digital image correlation analysis of a shake table test on a timber-framed structure filled with stones and earth», *Engineering & Structures*, vol. 123, 2016, pp 451-472.

Programmes de recherche associés à ce chapitre

ANR ReparH (Reconstruire parasinistre en Haïti) : Financement obtenu suite à l'appel à projet Flash Haïti, période 2010-2014, montant 570 keuros, en charge du programme expérimentale.

AGIR 2015 (Alpes Grenoble Innovation Recherche) : Financement obtenu suite à l'appel à projet AGIR pôle PEM, période 2015-2016, montant 30 keuros, porteur.

VOR 2015 et 2016 (Fédération Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques) : Financement obtenu suite à l'appel à projet de VOR, période 2015-2016, montant 7,5 keuros, porteur.

2.2 Approche multi-échelles

2.2.1 Présentation

Les constructions traditionnelles reposent sur des cultures constructives vernaculaires et par là même, elles ne bénéficient habituellement pas pour leur conception et leur réalisation, ni d'un cadre administratif légal, ni de méthodes de calculs réglementaires. L'étude de leur vulnérabilité requiert des travaux de recherche d'ordre expérimental et numérique pour le développement de méthode de calcul adaptée à ces constructions. Cependant, la modélisation numérique à l'échelle d'un bâtiment est difficile car elle nécessite une étude dynamique transitoire non linéaire et une discrétisation raffinée pour la description des phénomènes de dissipation d'énergie dans les dispositifs parasismiques traditionnels. Il en résulte des temps de calcul pouvant être très importants qui ne permettent pas une étude paramétrique pour l'optimisation de ce type de construction. C'est pourquoi l'équipe RV du laboratoire 3SR a développé une approche

multi-échelles permettant de concentrer les non-linéarités dans des macro-éléments afin de limiter le nombre d'éléments nécessaires pour représenter un bâtiment (Humbert *et al.* [2014] et Richard *et al.* [2002]). Cette méthode numérique nécessite des essais expérimentaux à différentes échelles afin de valider le caractère prédictif des modèles développés.

2.2.2 Haïti : exemple de la démarche

Lors de l'ANR ReparH, nous avons développé une démarche scientifique qui démarre par une observation et un recensement des différentes cultures constructives. Cette démarche peut aisément être utilisée dans un autre contexte que la reconstruction d'Haïti. Elle se décompose ainsi :

1. choix d'une typologie constructive (type de bâtiment),
2. détermination des rôles des éléments constructifs (structuraux et dissipateurs d'énergie), de leurs liaisons et de leurs interactions avec le reste du bâti,
3. évaluation de la variabilité mécanique des éléments constructifs pour une typologie constructive donnée,
4. le cas échéant, optimisation du système constructif en prenant en compte l'amélioration de son comportement parasismique (énergie dissipée) mais également son incidence sur le coût du bâti et sur sa possible difficulté d'appropriation par la population.

En exemple, le travail mené dans le cadre de l'ANR ReparH a conduit à la proposition d'une solution d'amélioration ci-dessous :

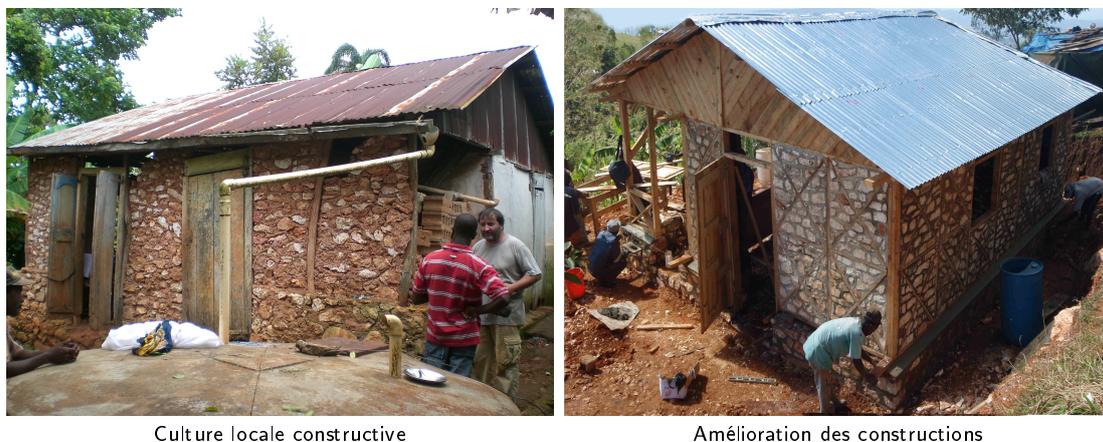


FIGURE 2.1 – Amélioration proposée de la culture constructive locale

A partir de la culture constructive haïtienne en ossature bois avec remplissage de pierre et mortier de terre, nous avons proposé la mise en place de croix de Saint-André et lisses intermédiaires pour :

- simplifier le remplissage qui s'effectue alors en cellule,
- améliorer la résistance aux cisaillements des murs,
- diminuer le mouvement global du mur dans la direction perpendiculaire au cisaillement en le divisant en cellules.

2.2.3 Les quatre échelles

Les quatre échelles retenues sont illustrées à la figure 2.2 et se décomposent ainsi :

- l'assemblage,
- la cellule élémentaire,
- le mur,
- la maison.

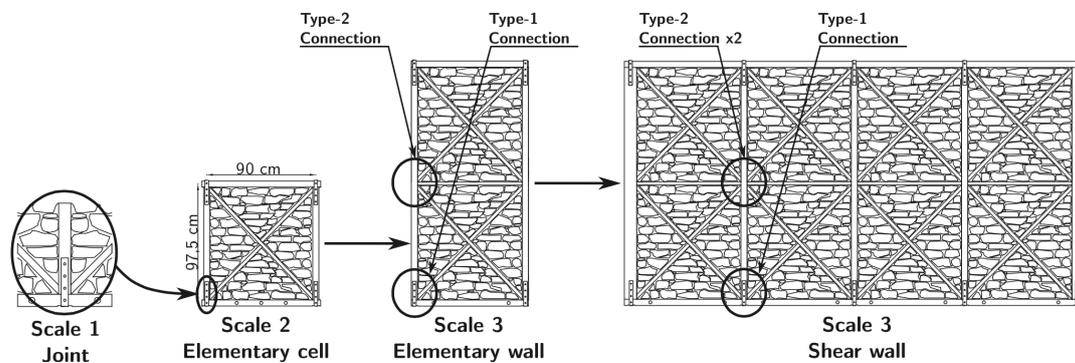


FIGURE 2.2 – Les 4 échelles de l'approche multi-échelles

L'assemblage poteau-poutre de l'ossature en bois est réalisé à l'aide de feuillards métalliques qui viennent enlacer l'ensemble et qui sont cloués. Ce système à 3 avantages : son faible coût, sa simplicité de mise en place et sa capacité hautement dissipatif d'énergie en cas de séisme. Dans un premier temps, une loi de comportement hystérétique non-linéaire est calibrée au niveau de cet assemblage grâce à une campagne d'essais expérimentale. Puis, l'échelle de la cellule est considérée et les paramètres du comportement hystérétique d'un macro-élément sont alors obtenus en ajoutant le rôle dissipatif du remplissage et des croix de Saint-André obtenu sur des essais à cette échelle. Nous disposons alors d'un modèle numérique qui peut aisément permettre de passer aux échelles supérieures : celles du mur et de la maison. Ces échelles sont étudiées de façon prédictives et des essais sont aussi menés pour valider le modèle et s'assurer de la qualité de l'outil développé.

Échelle 1 : l'assemblage

Cette échelle est celle de l'assemblage entre les poteaux et les poutres réalisé à l'aide de feuillards métalliques. C'est à la fois l'échelle la plus petite et celle qui, grâce à son système constructif présenté à la Fig. 2.3, localise le plus de dissipation d'énergie dans la typologie constructive en ossature bois avec remplissage. De façon expérimentale, le comportement non-linéaire hystérétique de cet assemblage a été déterminé via des essais pseudo-statiques monotones et cycliques en traction et cisaillement. Une étude paramétrique a aussi été réalisée pour déterminer l'influence du nombre de clous dans le comportement et un optimum de 8 clous a été obtenu et conservé ensuite. Plus de 30 essais ont été effectués afin de tenir compte des variabilités des résultats et de leur fiabilité. Puis nous avons calibré une loi de comportement phénoménologique développée par [Humbert et al. \[2014\]](#). La figure 2.4 présente ce calage pour les essais quasi-statiques monotoniques et la figure 2.5 ceux quasi-statiques cycliques. Les paramètres numériques sont alors ensuite utilisés pour la modélisation de l'échelle supérieure (celle de la cellule).

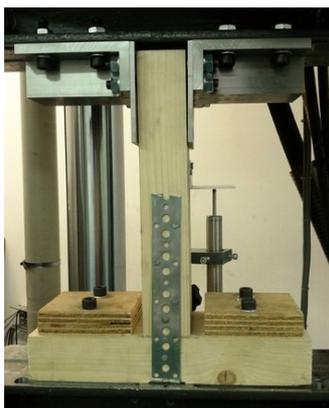


FIGURE 2.3 – Échelle 1 : connexion par un feuillard métallique

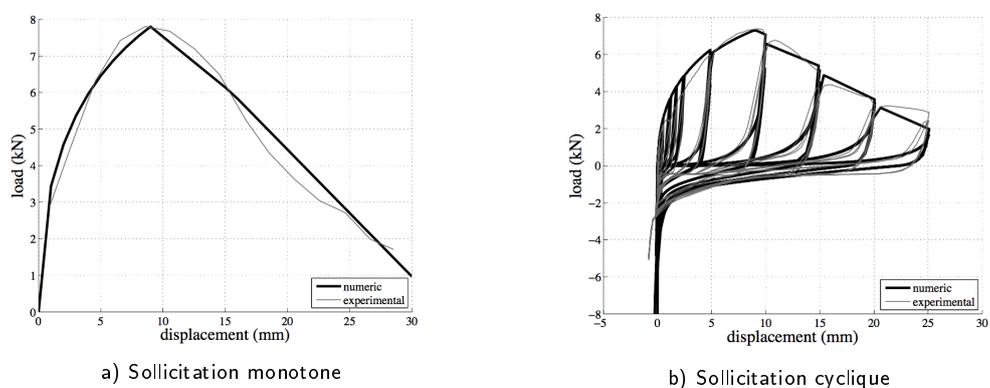


FIGURE 2.4 – Calage du modèle phénoménologique des essais de traction en quasi-statique

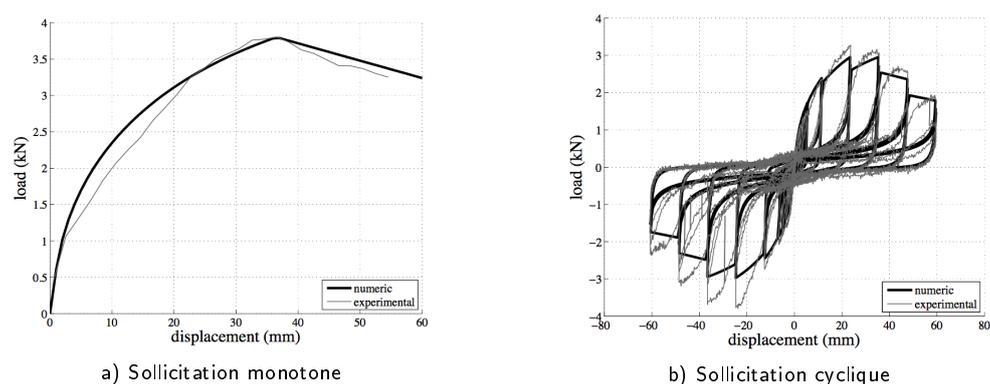


FIGURE 2.5 – Calage du modèle phénoménologique des essais de cisaillement en quasi-statique

Échelle 2 : la cellule

L'échelle de la cellule correspond à un motif identifiable dans la structure complète (d'un mur ou d'une maison) et qui est reproduit plusieurs fois à l'identique. Dans la typologie étudiée d'une structure en ossature bois avec remplissage, cette cellule élémentaire correspond à l'ossature en bois autour d'une croix de Saint-André (Fig 2.6). Expérimentalement, cette échelle

a beaucoup d'avantage par rapport à l'échelle structurelle d'un mur ou d'une maison entière : elle est beaucoup plus simple à réaliser et à tester du fait de sa dimension réduite (aux alentours d'un mètre carré) et elle permet aussi de faire des études paramétriques (influence type de remplissage, de la présence des croix de Saint-André). Les moyens d'essai pour caractériser son comportement cyclique sont aussi très simple à développer du fait de la faible valeur des efforts nécessaires à appliquer. Or justement, ces moyens d'essais manquaient cruellement au laboratoire 3SR. Nous avons donc conçu un mini-mur de réaction adapté à cette problématique qui avait l'avantage d'être déplaçable et ne nécessitait pas de dalle d'essai spécifique. La figure 2.7 montre la version finale de ce prototype contenant un système de guidage de l'effort servant aussi d'anti-déversement de l'échantillon, un vérin électrique d'une capacité de 40 kN et ± 20 cm de déplacement, une ossature métallique permettant d'assurer les encastremets en pied de l'échantillon et la reprise de l'effort horizontal appliqué, et un boîtier électrique contenant le pilotage et l'acquisition du vérin.



FIGURE 2.6 – Échelle 2 : la cellule élémentaire

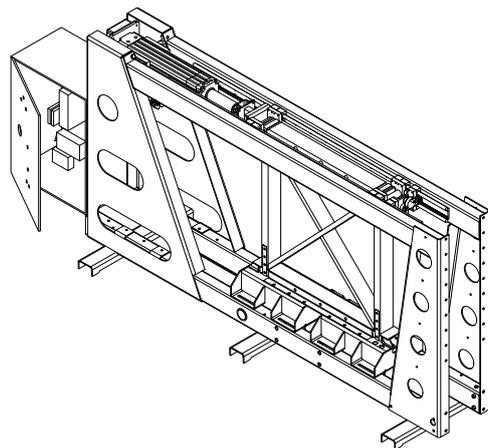


FIGURE 2.7 – Échelle 2 : Le mini-mur de réaction

Numériquement, deux approches sont développées. La première concerne la modélisation de la cellule en réalisant une modélisation détaillée des différents éléments et utilisant la loi de comportement phénoménologique du feillard calibrée à l'échelle de l'assemblage (Fig. 2.8). La dissipation d'énergie provenant des croix de Saint-André et du frottement du remplissage le long de l'ossature en bois est ajoutée. De plus, dans cette approche, des biais expérimentaux sont aussi considérés (frottement du système de guidage, de l'échantillon sur les rouleaux permettant son déplacement vertical, présence de butées).

Puis, à partir de cette approche, un macro-élément est développé et calibré afin d'obtenir dans un seul élément l'ensemble du comportement de la cellule. La courbe Fig. 2.9 montre qu'il est possible de reproduire fidèlement le comportement cyclique de cette cellule élémentaire. L'avantage de ce macro-élément est qu'il ne possède en réalité qu'un seul degré de liberté ce qui le rend extrêmement performant pour la modélisation du mur ou de la maison.

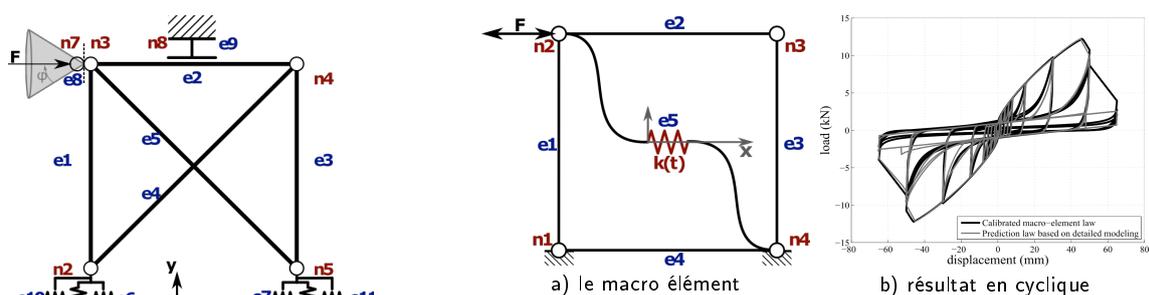


FIGURE 2.9 – Échelle 2 : calibration du macro-élément

FIGURE 2.8 – Échelle 2 : modélisation détaillée de la cellule

Échelle 3 : le mur

D'un point de vue numérique, cette échelle est étudiée afin de valider les simulations numériques réalisées à l'aide du macro-élément qui est calibré aux deux échelles précédentes. La modélisation du mur est donc réalisée de façon totalement prédictive.

D'un point de vue expérimental, les essais à la dimension d'un mur sont en soi une source conséquente d'information sur le comportement parasismique de la typologie constructive étudiée. Plusieurs types de structure traditionnelle en ossature bois avec remplissage avaient déjà été étudiés à cette échelle, citons ici les travaux de [Meireles et al. \[2012\]](#) ("Pombalino"), [Ali et al. \[2012\]](#) ("Dhajji-Dewari") et [Ceccotti et al. \[2006\]](#) ("Maso"). En ce qui concerne nos travaux, les résultats à cette échelle ont permis de valider le principe constructif proposé pour Haïti et à aider à sa promotion auprès de certaines ONG ayant des projets de reconstruction en zone urbaine ou rurale. Les essais ont été réalisés au centre de recherche Italien sur le bois CNR-Ivalsa à Trento en Italie disposant d'un banc d'essai pour ce type de structure (Fig. 2.10.)

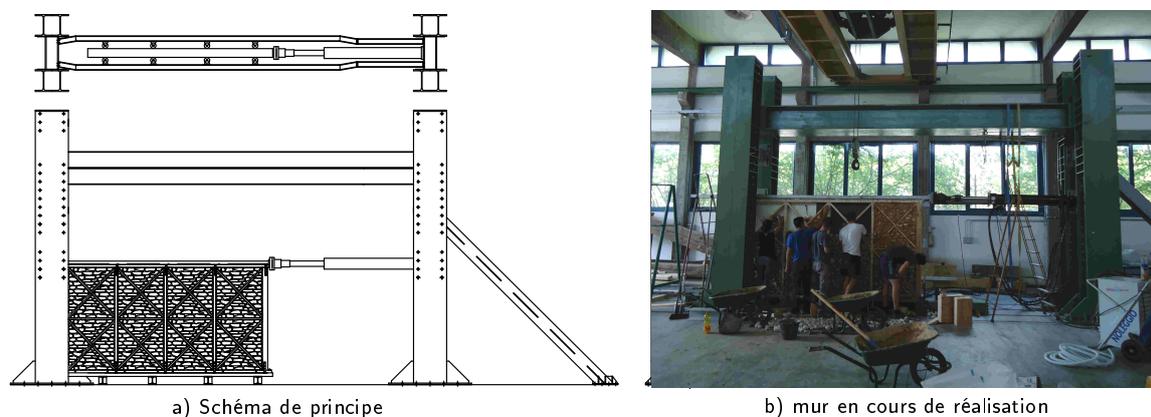


FIGURE 2.10 – Banc d'essai du CNR-Ivalsa

De plus, l'influence du remplissage a été mis en lumière à cette échelle ce qui n'avait pas été le cas à l'échelle de la cellule (échelle 2). En effet, sur la cellule, le remplissage n'apportait

aucune modification du comportement global de la cellule. Seule la présence de la croix de Saint-André pilotait la réponse du remplissage de la cellule. A l'échelle du mur, un nouveau type de connexion apparaît, celui de type 2 de la figure 2.2 qui correspond à la liaison des traverses et des poteaux. Deux types de mur ont été testés, l'un avec et l'autre sans remplissage. Les résultats sont totalement différents puisque dans le cas avec remplissage, le déplacement du mur est très rigide et seule la connexion des feuillards est mise en jeu (Fig. 2.11a)) alors que sans remplissage, les poteaux se déforment en flexion et que les traverses, constituées de portions non continues entre deux cellules, se séparent (Fig. 2.11b)).

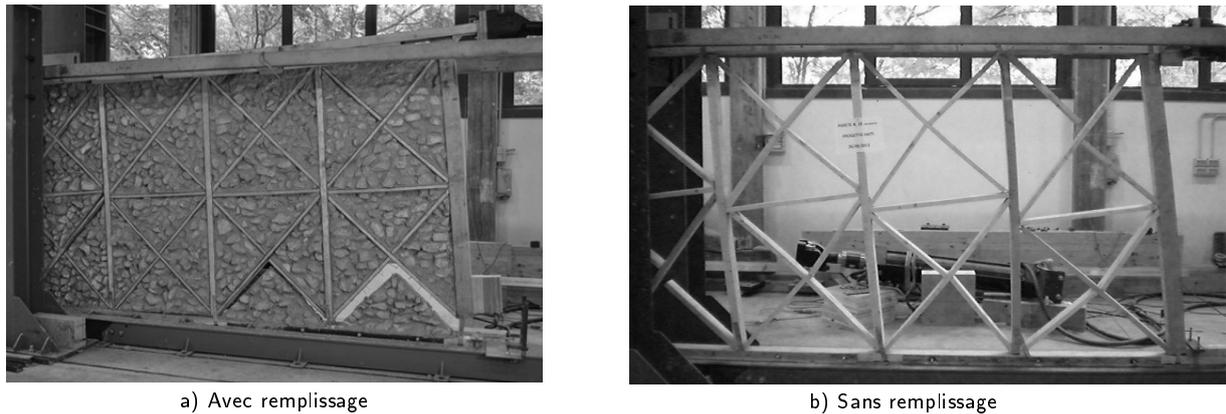


FIGURE 2.11 – Essais de cisaillement en quasi-statiques pour un mur avec ou sans remplissage

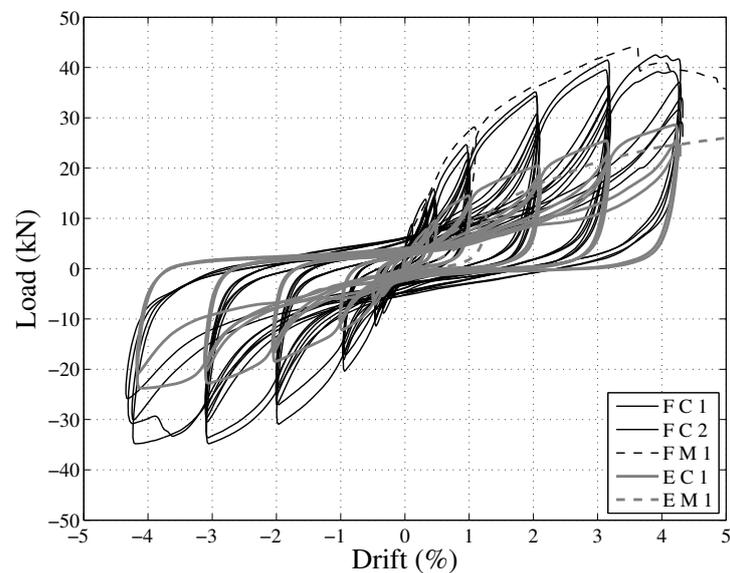


FIGURE 2.12 – Diagramme Force-Drift des murs avec ou sans remplissage

La figure 2.12 présente le comportement cyclique des quatre murs testés. Dans les deux configurations (avec ou sans remplissage), un seul essai monotonic en quasi-statique a été effectué (*FM* pour le mur avec remplissage et *EM* celui sans). Trois essais cycliques ont été réalisés,

deux pour le mur rempli (*FC1* et *FC2*) afin de connaître la variabilité des résultats et un seul pour le mur vide (*EC*). L'influence du remplissage est substantielle sur la résistance maximale, la raideur initiale et l'effort résiduel. Ces essais permettent aussi d'observer la large ouverture des boucles hystérétiques, caractéristiques d'un système possédant une capacité importante de dissipation d'énergie.

La modélisation numérique prédictive réalisée par assemblage de macro-éléments est présentée à la figure 2.13. Elle ne concerne que le mur avec remplissage. La figure 2.14 présente les résultats obtenus qui sont satisfaisants compte tenu que le modèle utilisé est calibré uniquement sur les essais de la cellule élémentaire et de l'assemblage par feuillards (échelle 1 et 2). Le modèle ne prend pas en compte la présence de connexion de type 2 ce qui explique vraisemblablement les différences obtenues avec les essais sur mur, en particulier du côté négatif. Cependant, bien que des différences importantes existent entre les forces maximales (entre 4 à 12% en positif et autour de 30% en négatif), l'énergie dissipée cumulée est obtenue avec une grande précision (autour de 1,3%). Ceci est présenté sur la Fig. 2.15.

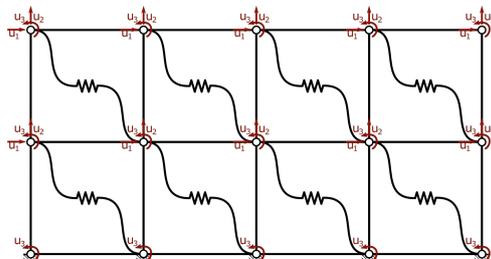


FIGURE 2.13 – Échelle 3 : assemblage des macro-éléments

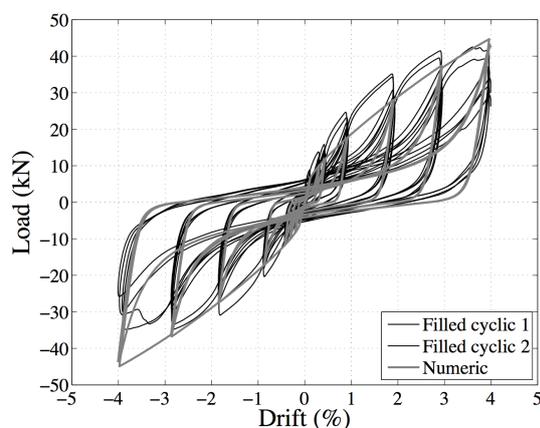


FIGURE 2.14 – Échelle 3 : comparaison numérique/expérimental

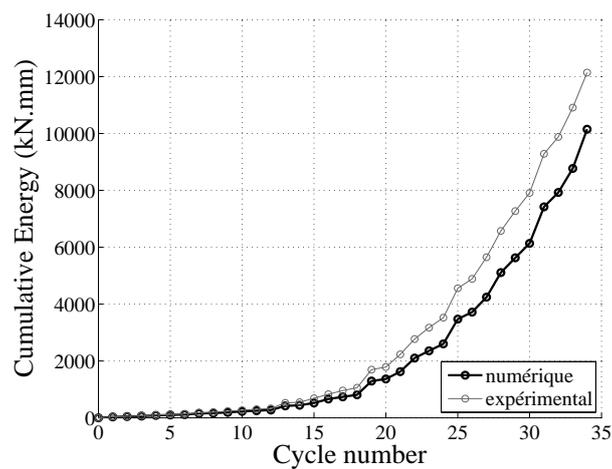


FIGURE 2.15 – Échelle 3 : comparaison numérique/expérimental (essai cyclique 1) sur l'énergie cumulée

★ **Remarque** : Dans cette partie, nous avons montré que la modélisation réalisée était capable de reproduire le comportement du mur obtenu expérimentalement. En particulier, nous avons été capable de reproduire le comportement jusqu'à une charge d'endommagement très forte du mur. Ce travail est totalement classique dans ce type d'approche pour caractériser le comportement parasismique d'une typologie constructive. Cependant, il faut bien garder à l'esprit que le chargement dynamique provenant d'un séisme sur ce type de construction sans étage ne sollicitera le mur que dans la première partie de la courbe obtenue en chargement cyclique quasi-statique du fait de la quasi absence de masse provenant du toit. En effet, la loi de la dynamique $F = m \cdot a$ appliquée à l'échantillon testé et en prenant en compte un séisme 3 fois plus fort que celui de 2010 en Haïti (cf. Tab. 2.2) conduit à une force maximale proche de 9 kN. Dans l'optique de mieux appréhender le comportement de ces constructions sous sollicitation sismique il est donc important de mieux caractériser le comportement sous faible chargement plutôt que d'essayer de reproduire un comportement fortement endommagé qui ne sera pas mis en jeu. Une difficulté apparaît ici au niveau expérimental : améliorer l'acquisition des données sous faible chargement. Ceci étant particulièrement difficile car au début des essais, il existe toujours une période d'approche initiale avant que la réponse de l'échantillon soit réellement mis en place due aux jeux des différentes conditions limites.

Échelle 4 : la maison

L'étude réalisée et présentée brièvement dans ce mémoire n'aurait pas été complète sans une validation sous sollicitation dynamique d'un séisme. Grâce à une opportunité exceptionnelle d'utiliser pendant 1 mois la table vibrante uni-axiale du FCBA (l'institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement) de Bordeaux, nous avons construit et testé une maison à échelle 1 en utilisant différents types de signaux sismiques. Nous présenterons dans un premier temps les essais expérimentaux réalisés et les modélisations numériques effectuées. Cependant, il est important de préciser que la modélisation numérique a été réalisée avant les essais expérimentaux, "à l'aveugle", afin de mieux appréhender les essais expérimentaux et de

définir la position de la structure ainsi que les signaux à utiliser.

★ **Essais expérimentaux** : la maison construite sur la table-vibrante (Fig. 2.16) correspond aux différents projets de reconstruction réalisés en Haïti par Concert-Action, Entrepreneurs du Monde et Misereor (Fig. 2.1). Cependant, pour nous prémunir d'un comportement en torsion de la maison, nous avons choisi de réaliser une maison symétrique par rapport à l'axe de chargement. Ces dimensions sont de 4,65 m × 4,65 m au sol et de 3,37 m de haut au faîtage. Chaque mur est constituée de 6 poteaux et deux faces contiennent une fenêtre alors que deux autres (correspondant au murs de cisaillement, Fig. 2.17) contiennent une porte et une fenêtre. La maison est encreée sur la table vibrante à l'aide d'un profilé métallique permettant d'encaster les lisses basses (les poutres inférieures). Les murs de soubassement existants dans les projets de reconstruction n'ont pas été réalisés car difficilement encastrable sur la table. Ces derniers étant une source de dissipation d'énergie, la solution testée est donc dans une configuration défavorable. De même, la position du toit a été choisie afin d'être dans la configuration la plus défavorable par rapport au mur. Trois semaines ont été nécessaires pour construire la maison sur la table vibrante par une équipe multidisciplinaire de 8 architectes et de 3 ingénieurs en Génie Civil.



FIGURE 2.16 – La maison réalisée sur la table vibrante

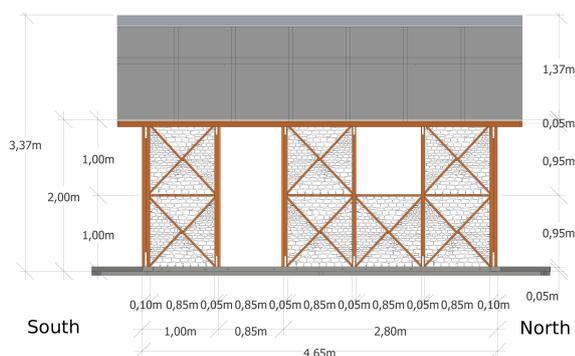


FIGURE 2.17 – Dimensions d'un mur de cisaillement

Le tableau 2.1 résume les caractéristiques de la table vibrante de Bordeaux.

Dimensions	6×6	m ²
Masse	6	tons
Masse embarquée	10	tons
Max. dépl.	± 0.125	m
Max. vit.	0.75	m/s
Max. acc.	4	g
Gamme de fréquence	0 - 30	Hz
Moment de renversement ultime	250	kN.m

TABLE 2.1 – Caractéristiques de la table vibrante

Concernant le signal sismique utilisé pour l'essai, une collaboration a été mise en place avec le CETE Méditerranée afin de générer un accélérographe représentatif de l'événement de magnitude $M_w=6,8$ équivalent à celui du 12 janvier 2010 ayant eu lieu à 34 km à l'ouest de

Port-au-Prince. En effet, aucune station d'enregistrement n'a réellement enregistré ce séisme, mais cependant, les répliques ont été enregistrés et à partir d'elles et en utilisant des lois de similitudes, il a été possible de générer un signal synthétique représentatif. Ce signal, appelé le Haïti 100%, est ensuite augmenté d'un facteur de 2 puis de 3 (correspondant aux limites de la table) en accélération, vitesse et déplacement afin d'augmenter les endommagements de la structure.

Un deuxième signal sismique a été utilisé, caractéristique de l'activité sismique dans les Antilles française (nommé de Guadeloupe). Celui-ci a la particularité d'avoir pour spectre de réponse élastique le spectre de dimensionnement réglementaire de l'Eurocode 8. Ce deuxième signal a été choisi car d'une part, son PGA (Peak Ground Acceleration) est proche de celui de Haïti et que d'autre part la table vibrante du FCBA a été dimensionné afin de reproduire ce dernier, ce qui permet d'augmenter le facteur d'amplification à la valeur de 3,9. Ce signal possède un spectre riche en basse fréquence (inf 3 Hz) et a donc été utilisé en phase finale des essais comme un séisme fort.

La figure 2.18 représente le signal temporel en accélération de Haïti 100% et de Guadeloupe 100% ainsi que la comparaison du spectre de réponse élastique des deux signaux.

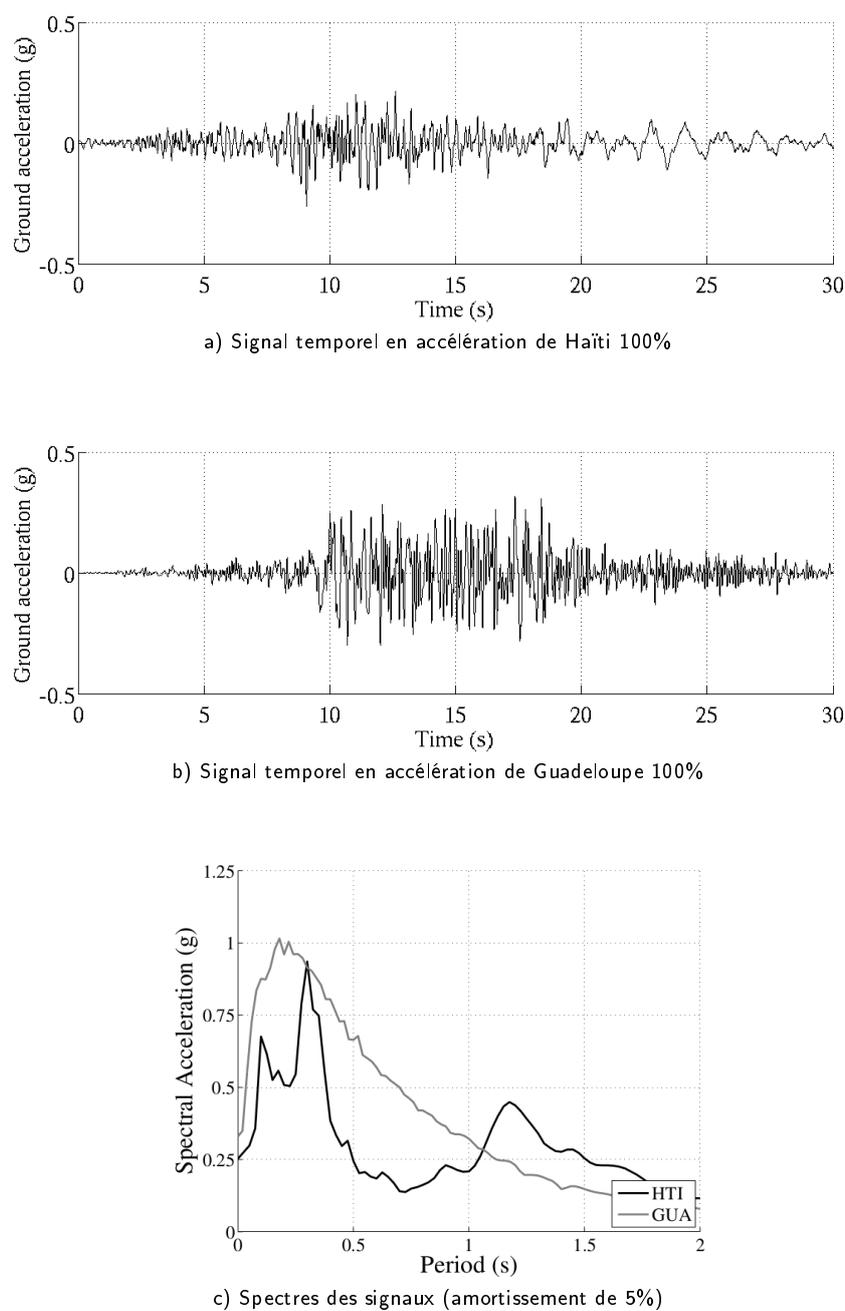


FIGURE 2.18 – Contenu fréquentiel et en temps des signaux correspondants à Haïti 100% et à Guadeloupe 100%

Le tableau 2.2 présente le protocole expérimentale réalisé lors des essais. Avant chaque essai, un bruit blanc a été appliqué à la structure afin de déterminer l'évolution des fréquences fondamentales et donc de l'endommagement de la structure. Ceci est effectué en traçant les fonctions de réponse en fréquence (FRF) entre l'accélération enregistrée en tête du mur hors-plan et l'accélération enregistrée sur la table (Fig. 2.19). Le séisme de Haïti 100% n'a pas modifié l'amplitude du spectre et a faiblement décalé la fréquence propre. Ceci est probablement dû au réarrangement structurel des différents éléments au début de l'essai (jeux existants). Ensuite le passage des signaux de Haïti 200 et 300% a considérablement abaissé l'amplitude et la fréquence propre de la structure ce qui caractérise une diminution de la raideur consécutive

à un endommagement. Cependant rien n'était visible à l'œil nu sauf pour Haïti 300% où les croix de contreventement du toit se sont détachées et ont été remises en place avant l'essai avec le signal de Guadeloupe 100%. Ce signal n'entraîna pas d'endommagement visible sauf que le contreventement du toit fut de nouveau détaché de la toiture et que nous l'avons remis en place avant de jouer le dernier signal, celui de Guadeloupe 390% qui fit tomber un triangle de remplissage au niveau du mur hors plan.

Signal sismique	Facteur d'amplification	déplacement max. (mm)	Vitesse max. (m/s)	PGA (g)
Haiti 100%	1	35.7	0.158	0.27
Haiti 200%	2	71.4	0.316	0.54
Haiti 300%	3	107.1	0.474	0.77
Opération de réparation				
Guadeloupe 100%	1	30.9	0.168	0.32
Opération de réparation				
Guadeloupe 390%	3.9	117.3	0.637	1.26

TABLE 2.2 – Protocole expérimental

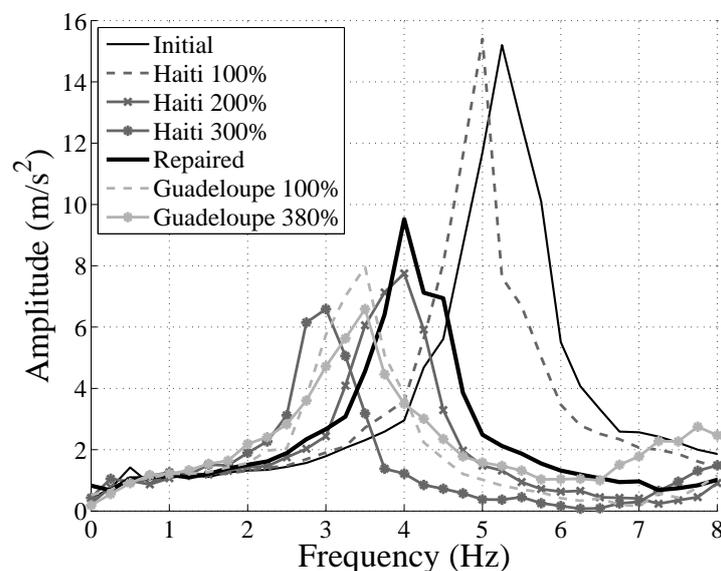


FIGURE 2.19 – FRF des bruits blancs effectués après chaque signal

L'analyse modale expérimentale a permis d'identifier trois modes principaux (Fig 2.20). Les deux premiers sont similaires et correspondent aux mouvements hors-plan des murs hors-plan qui, malgré une construction identique, ont des raideurs légèrement différentes. Le troisième mode correspond aux murs de cisaillements.

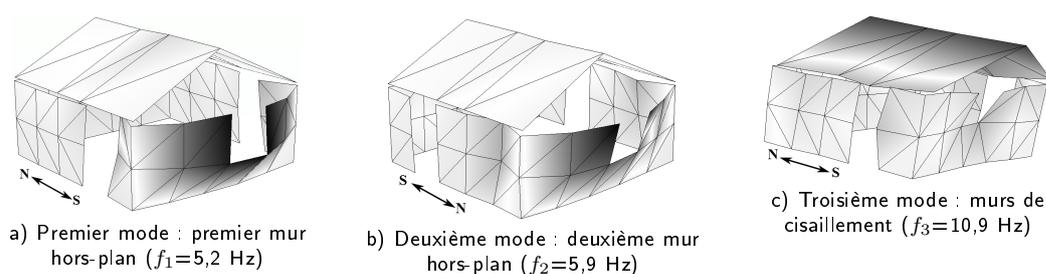


FIGURE 2.20 – Modes propres de la structures obtenus expérimentalement avant les essais sismiques

★ **Essais numériques** : la modélisation numérique a été réalisée en amont des essais expérimentaux sur table vibrante. Elle consiste en l'assemblage des macro-éléments calibrés à l'échelle 1 et 2. Une représentation du maillage est présentée à la figure 2.21, dont l'ossature apparaît pour des questions de visualisation de la structure. La répartition de la masse du remplissage est illustrée à la figure 2.22, sa valeur est proportionnelle au rayon de la sphère correspondante. Grâce à cette approche de type "modélisation simplifiée", les calculs pour le passage d'un signal sismique à l'échelle du bâtiment entier durent environ 1 heure.

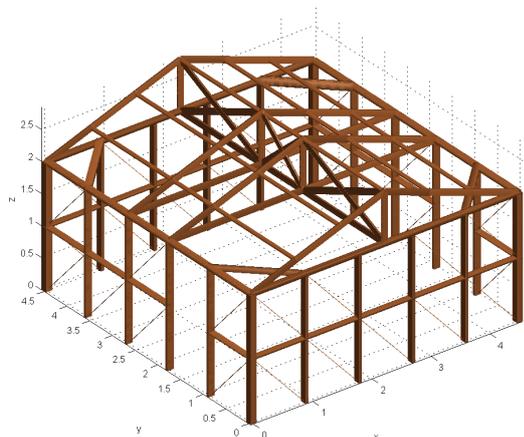


FIGURE 2.21 – Maillage de la structure

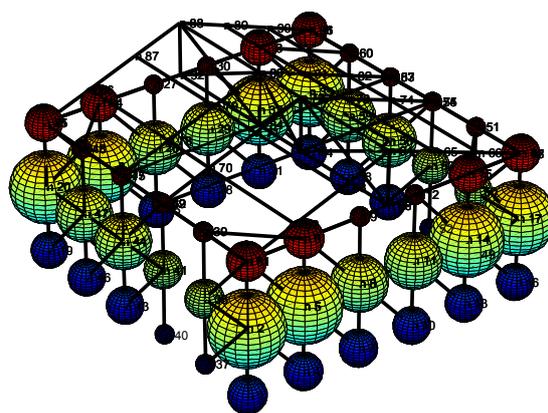


FIGURE 2.22 – Répartition de la masse du remplissage aux nœuds

La représentation des déformés modales et des valeurs des fréquences des modes propres prédites par le modèle est illustrée à la figure 2.23. Ces résultats numériques concordent avec les résultats expérimentaux même si toutefois il subsiste quelques différences provenant notamment de la difficulté d'appréhender la raideur initiale de la cellule élémentaire lors des essais à l'échelle 2.

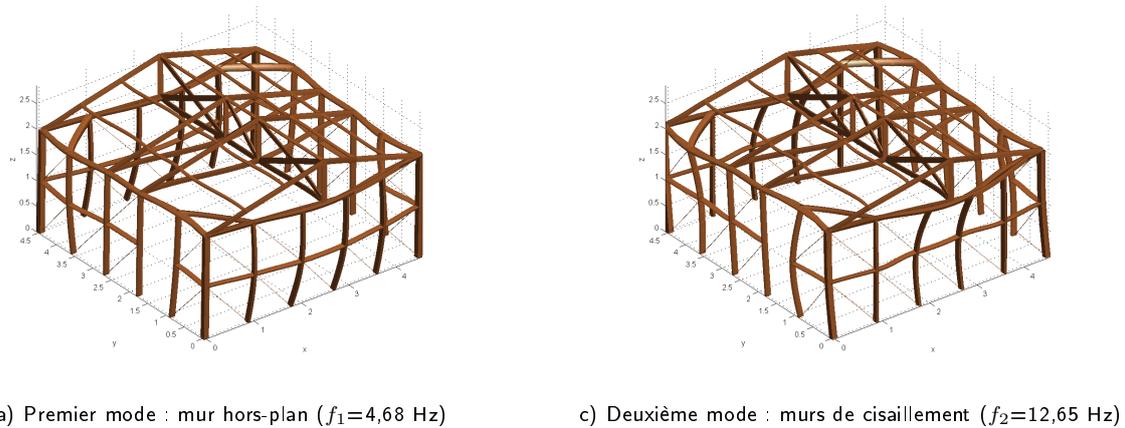


FIGURE 2.23 – Modes propres de la structures obtenus numériquement

A titre de comparaison, nous présentons ci-dessous les résultats obtenus pour les trois séismes d'Haïti. Ceux correspondant au signal de Guadeloupe donnent le même type de commentaire.

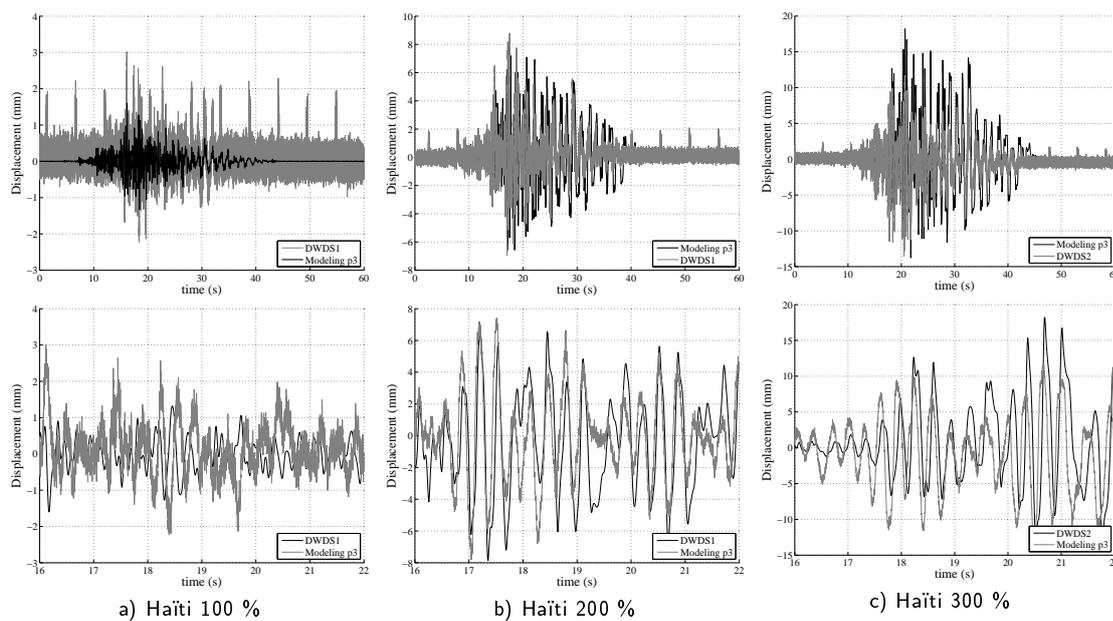


FIGURE 2.24 – Comparaison du déplacement en tête du mur de cisaillement (pour tout le signal et pour un zoom)

La prédiction du modèle numérique concernant le déplacement en tête du mur de cisaillement donne une bonne estimation par rapport aux déplacements enregistrés par l'intermédiaire d'un capteur à fil (dénommé DWDS1 dans les figures 2.24). Concernant Haïti 100%, les résultats du capteur à fil sont très bruités par rapport aux grandeurs mesurées qui sont très faibles. Finalement, étant donné que le modèle numérique a été développé à partir de la seule connaissance du comportement de l'assemblage et de la cellule élémentaire et étant donné la simplicité du modèle, il est raisonnable de dire que ce modèle est performant et permet de prédire correctement l'ordre de grandeur des phénomènes décrits à l'échelle de la maison (fréquences

propres, déplacements, endommagements successifs).

2.3 La corrélation d'images

Bien que déjà très riche en information, les essais sur table vibrante d'une structure sont difficiles à instrumenter du fait des mouvements dynamiques de la table. Nous avons vu dans la partie précédente que nous avons utilisé des capteurs de déplacements de type LVDT ou capteurs à fil et des accéléromètres afin de déterminer le comportement de la structure. Ces capteurs "classiques" sont tous à contacts et nécessitent la mise en place de structures rigides positionnées en dehors de la table vibrante et considérées comme des points fixes. Cependant, nous avons aussi vu que certains capteurs à fil étaient très bruités du fait probable de la vibration du câble lui-même ou de la vibration induite par le mouvement de la table à l'ensemble du bâtiment du FCBA. Pour palier à cette difficulté, une instrumentation par caméra rapide a été développée pour suivre le champ des déplacements sur un mur de cisaillement. Une abondante bibliographie existe sur l'utilisation de la corrélation d'images sur des structures en Génie Civil, mais sur des essais dynamiques, la corrélation d'images a toujours été effectuée de façon locale en utilisant des points cibles et non en mesure de champs (Hyoung-Suk *et al.* [2011], van de Lindt *et al.* [2010], Ribeiro *et al.* [2014])). Des mesures de champs ont été mises en place sur un essai dynamique au niveau d'une poutre pour suivre l'endommagement par Shih *et Sung* [2013]. Le travail présenté ci-dessous est donc particulièrement innovant puisque c'est la première fois que des mesures de champs sont réalisées en dynamique à l'échelle d'une maison. Une caméra rapide à haute résolution (Phantom v641, Fig. 2.25) a été utilisée. Ces caractéristiques techniques dans la configuration utilisée sont données au tableau 2.3. La résolution maximum est utilisée (2500×1600 pixels) afin d'avoir la meilleure précision possible sur le champ de mesure du mur : 2,16 mm par pixel. La fréquence de prise de vue est calibrée à 150 images par seconde afin de pouvoir enregistrer en continu toute la durée de l'essai dynamique, ce qui nécessite l'utilisation d'une mémoire de stockage additionnelle. Après extraction, chaque test sismique conduit à générer 7500 images d'un poids de 8,2 Megabites chacune en .tif.

Caméra vidéo	Caractéristiques techniques
Modèle	Phantom v641
Résolution	2560 × 1600 HD
Fréquence	150 fps
Mémoire ajoutée	128 Gigabits phantom CineMag
Durée d'enregistrement	50 s
Déclencheur	hardware trigger BNC synchronisé avec les autres système de mesures (lvdt et accéléromètres)
Lentille	Nikkor Ai-S 28mm f/2
Distance du mur	6.1m
Fenêtre de champs	5.4m
Résolution	2.16 mm/px



FIGURE 2.25 – Caméra Phantom v641

TABLE 2.3 – Configuration utilisée

Un éclairage particulier a été mis en place et est présenté à la figure 2.26. Il consiste en une seule source de lumière de 4000 Watts (4K alpha version) positionnée à 6,5 m de recul par rapport au mur et permet un réglage aisé de la diffusion de l'intensité lumineuse par rapport à une solution avec plusieurs sources lumineuses. Un ballast à haute fréquence est aussi utilisée afin de se prémunir des problèmes de scintillement avec la fréquence d'échantillonnage de la caméra.



FIGURE 2.26 – Vue globale du système utilisé (mur de cisaillement, éclairage et position de la caméra)

Un mouchetis a aussi été réalisé sur l'ensemble du mur de cisaillement afin de s'assurer que

la fenêtre de suivie de chaque pixel ait bien une identité spécifique en valeur de gris. La taille des points du mouchetis doit être réalisée de façon aléatoire mais tout en restant en relation avec le nombre de pixels contenu dans la fenêtre de suivie. Nous avons réalisé ce mouchetis en projetant de la peinture acrylique à partir d'un pinceau et de façon totalement manuelle. Ceci nous a permis d'avoir des points de positions et de dimensions aléatoires compris entre 1 et 6 pixels avec la résolution de la caméra, ce qui correspond au préconisation de [Hua et al. \[2011\]](#). La mise en place de ce mouchetis et une vue spécifique du résultat est présentée à la figure 2.27.

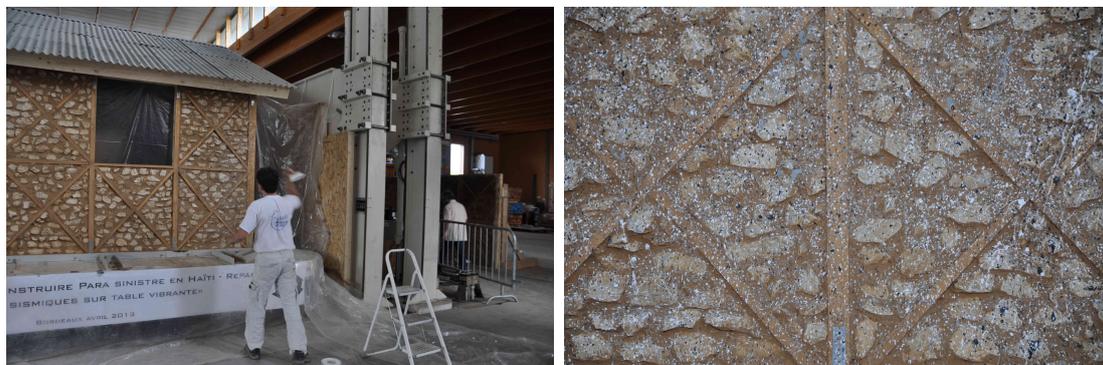


FIGURE 2.27 – Projection de la peinture et vue spécifique du mouchetis

Pour la corrélation d'images, nous avons utilisé le logiciel Tracker développé au laboratoire 3SR ([Combe et Richefeu \[2013\]](#), [Richefeu et al. \[2012\]](#)). Ce logiciel est basé sur le suivi de corps considérés comme indéformables ce qui est une assumption acceptable au vu des faibles déplacements de notre structure par rapport à ses dimensions. Il permet aussi d'avoir une résolution au subpixel par une interpolation bilinéaire des fonctions de niveau de gris ce qui nous permet d'avoir une précision finale de 0,216 mm par pixel. La corrélation est effectuée en se reportant systématiquement à la première image, définie comme image de référence.

Dans un premier temps, nous avons validé la méthode de corrélation d'images numérique (CIN ou DIC en anglais) mise en place en comparant le déplacement de la table obtenu par un LVDT et celui obtenu par corrélation d'images. À titre d'illustration, la figure 2.28 montre la similitude entre les deux moyens de mesure pour le séisme d'Haïti 300%.

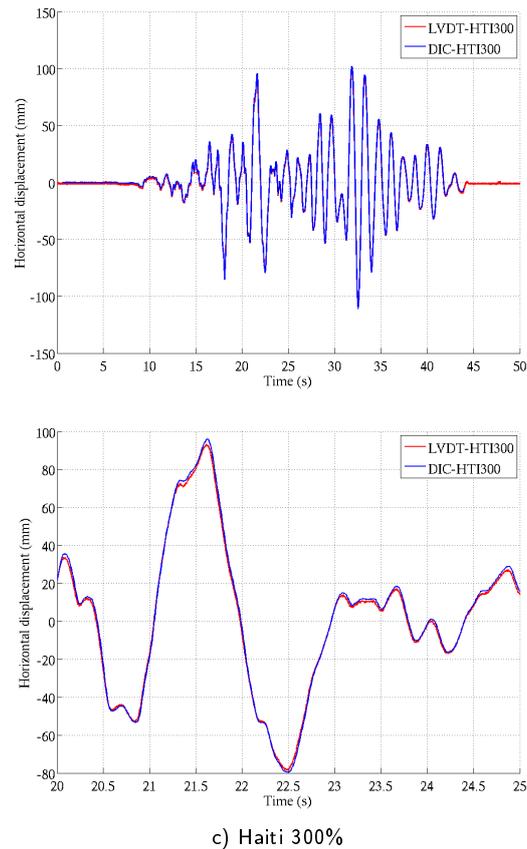


FIGURE 2.28 – Haïti 300% - Comparaison entre la CIN et LVDT pour le déplacement de la table vibrante (pour tout le signal et pour un zoom contenant les pics)

Grâce à cette méthode de mesure de champs, nous avons pu *observer* finement le comportement du mur et ainsi mieux comprendre les phénomènes de dissipation d'énergie entre les différents éléments de la structure. A titre d'illustration, la figure 2.29 présente le déplacement amplifié de 50 fois de plus de 4000 pixels avec un jeu de couleur rouge pour les croix de Saint-André, noir pour l'ossature en bois et bleu pour le remplissage. Nous constatons clairement sur cette figure que le remplissage ainsi que les parties des croix de Saint-André qui sont discontinues, se séparent, ce qui permet à la structure de dissiper de l'énergie sans conduire à sa ruine. Ceci est d'autant plus important qu'il était impossible de faire une telle observation à l'œil nu ou avec les capteurs à contact classique.

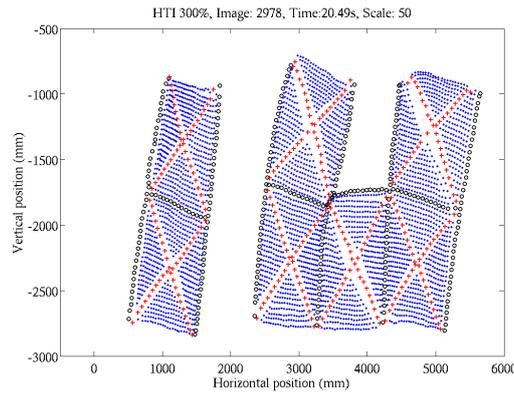


FIGURE 2.29 – Champs de déplacement pour Haïti 300%

A partir de ces résultats, nous avons pu déterminer de façon quantitative les valeurs maximales de décollements entre les deux parties non-continues des croix de Saint-André pour chaque cellule (définies à la Fig. 2.30) pour l'ensemble des séismes. Cela a permis de mettre en lumière l'importance de la direction des diagonales non continues dans les cellules du mur par rapport au sens de la sollicitation. En effet, comme le montre la figure 2.31 les décollements sont d'autant plus importants dans la direction positive (vers la droite de la Fig. 2.30) par rapport à la direction négative (vers la gauche) du fait de la position des diagonales non continues dans les cellules C3, C5 et C6.

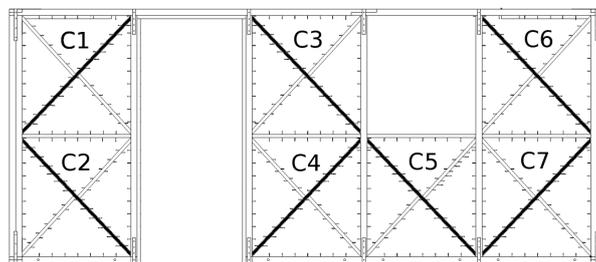


FIGURE 2.30 – Position des diagonales continues dans les croix de Saint-André

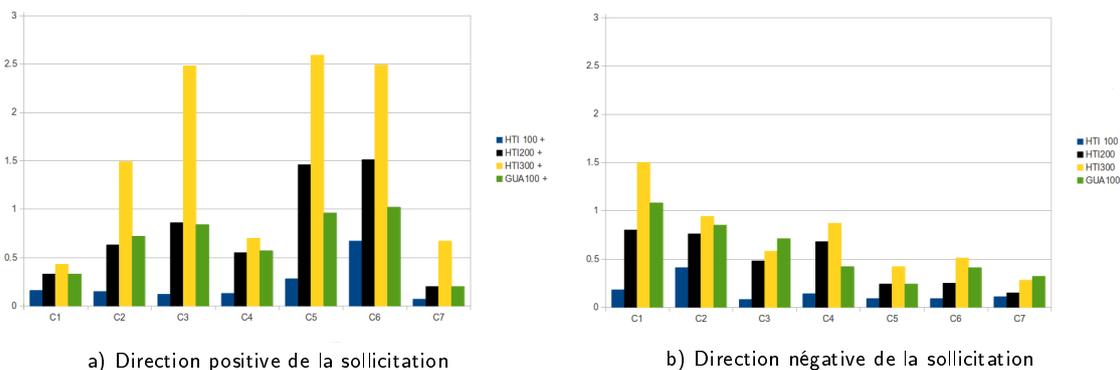


FIGURE 2.31 – Décollement maximum entre les diagonales non-continues

A partir du champ de déplacement, nous pouvons obtenir le champ d'accélération grâce à une double dérivation en temps. Cette méthode est particulièrement efficace car la fréquence d'enregistrement des images nous permet d'avoir une bonne précision. En effet, nous avons pu calculer le champ d'accélération en déterminant un polynôme du second degré représentant le déplacement d'un pixel pour 7 images consécutives. Une première dérivation est alors effectuée et un deuxième polynôme du second ordre est alors recherché correspondant à la vitesse d'un pixel pour 7 images consécutives. Une seconde dérivation est alors effectuée ce qui donne le champ d'accélération. Cette méthode a été validée en comparant les valeurs enregistrées par l'accéléromètre de la table vibrante à l'accélération obtenue par CIN d'un pixel sur la table vibrante. Les résultats étant similaires pour tous les signaux sismiques joués sur la table, nous présentons ici uniquement ceux de Haïti 300%. La figure 2.32 prouve que les résultats entre les méthodes sont similaires. Ceci est aussi confirmé sur la figure 2.33 représentant la réponse fréquentielle par une transformée FFT (Fast Fourier Transform).

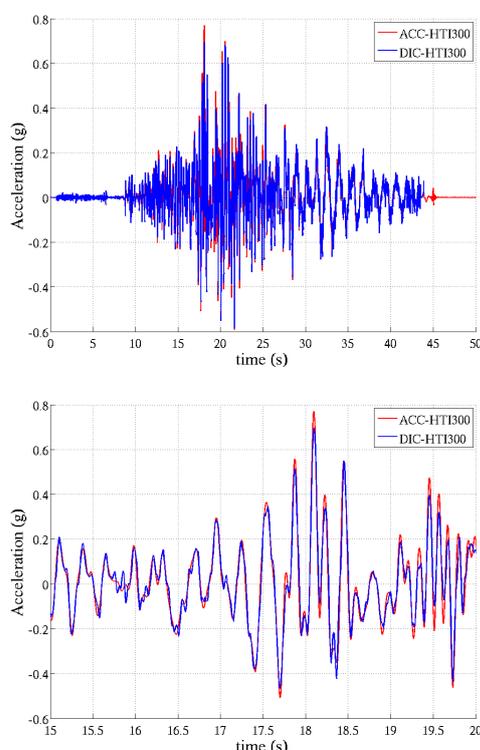


FIGURE 2.32 – Accélération : comparaison entre la CIN et un accéléromètre sur la table vibrante (pour tout le signal et pour un zoom contenant les pics)

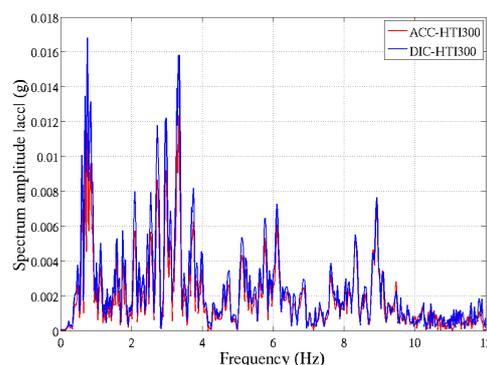


FIGURE 2.33 – FFT : comparaison entre la CIN et un accéléromètre sur la table vibrante (pour tout le signal)

L'obtention de l'accélération à chaque pixel suivi nous permet aussi de remonter à la force sollicitante grâce à la connaissance de la masse associée à ce pixel. Ceci nous a permis de déterminer la force de cisaillement dans chaque cellule et dans l'ensemble du mur. La figure 2.34 montre la force de cisaillement obtenue pour l'ensemble du mur sur les 5 signaux sismiques. Ceci montre clairement que le séisme de Haïti 100% sollicite le mur de cisaillement de la maison de façon élastique. Les non-linéarités et la dissipation d'énergie augmentent lorsque la raideur diminue après chaque signal sismique correspondant à Haïti 200% et Haïti 300%,

ce qui révèle un endommagement dans la structure (Tab. 2.4). Lors du passage des signaux de Guadeloupe, la structure présente un endommagement provenant des essais avec les signaux de Haïti et correspondant principalement aux décollements des interfaces entre le remplissage et les croix de Saint-André (comme discuté ci-dessus).

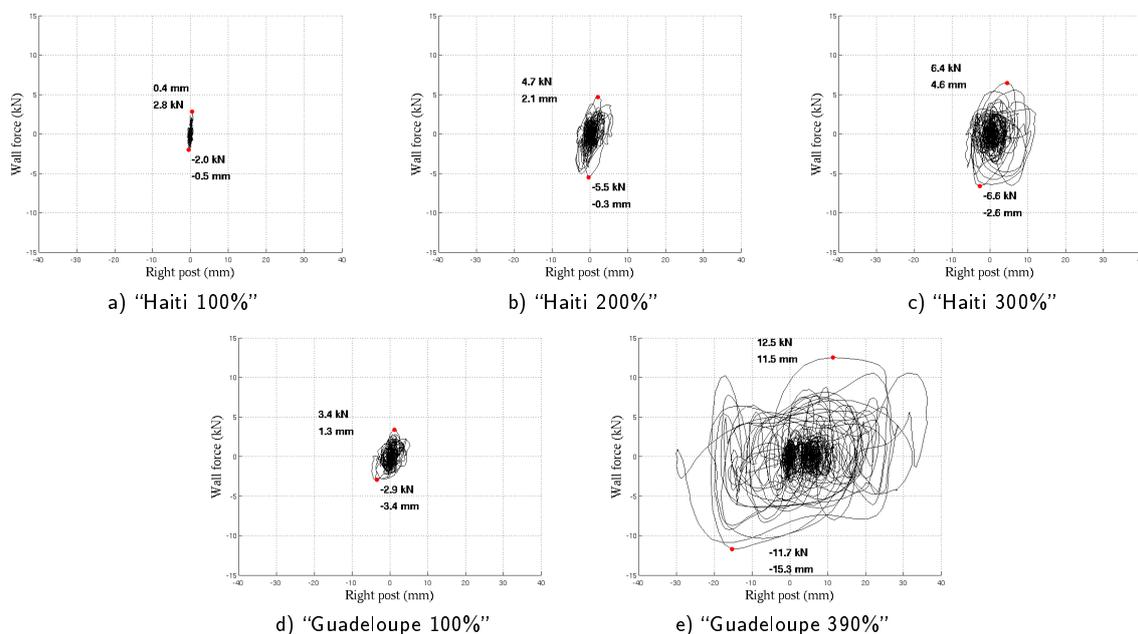


FIGURE 2.34 – Force globale du mur de cisaillement en fonction du déplacement à droite en tête

Earthquake	Haiti 100%	Haiti 200%	Haiti 300%	Guadeloupe 100%	Guadeloupe 390%
Réponse globale hystérétique du mur de cisaillement (kN/mm)	5.31	4.25	1.82	1.34	0.90

TABLE 2.4 – Valeur de la raideur effective

2.4 Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre nous avons montré l'importance de développer une recherche appliquée en Génie Civil sur les cultures constructives traditionnelles afin d'aider à la reconstruction des pays en voie de développement et d'aider les communautés à être plus résilientes. Dans les pays développés, ce sujet est aussi primordiale afin de promouvoir une construction plus respectueuse de l'environnement, basée sur les matériaux disponibles localement et permettant aussi de conserver le patrimoine culture et l'identité locale.

Dans cette optique, nous avons développé ces dernières années une méthode de modélisation numérique particulièrement efficace en terme de coût de calcul et basé sur l'utilisation de macro-élément concentrant les non-linéarités, évitant une description fine de la structure. Cette approche est basée sur une analyse multi-échelles du fonctionnement de la structure et

nécessite la calibration du modèle par des essais expérimentaux sur des assemblages et sur le comportement d'un élément représentatif du système constructif. C'est donc une méthode très facile à mener et qui ne nécessite pas des moyens expérimentaux d'envergure. Nous avons validé cette méthode en comparant les résultats prédictif de la modélisation sur des essais quasi-statique cyclique à l'échelle d'un mur et sur des essais sismiques sur table vibrante à l'échelle d'une maison. Cette comparaison a montré la fiabilité de la méthode numérique utilisée.

Ainsi, l'outil numérique développé permet aujourd'hui de prédire le comportement des structures en ossature bois avec remplissage. Il pourrait être facilement utilisé par des ingénieurs en charge du dimensionnement de ce type de structure pour la reconstruction en Haïti. Il resterait à mettre en place ce transfert de connaissance pour finaliser ce projet.

L'ensemble du projet, mené du côté sciences humaines et du côté sciences et technologies de l'ingénierie, a permis d'obtenir une autorisation administrative d'utiliser ce principe constructif par le ministère haïtien en charge de la construction. Ceci confère à la fois une légalité aux projets opérationnels et une reconnaissance institutionnelle de la solution proposée.

Les perspectives de recherche dans le domaine des cultures constructives traditionnelles et du patrimoine historique sont nombreuses tant les typologies constructives sont variées. Nous en sommes actuellement qu'au balbutiement puisque la communauté scientifique n'a, jusqu'ici, pratiquement jamais investie ce champ de recherche.

Ainsi, nous allons maintenant investiguer le rôle des inclusions en bois présents dans un grand nombre de typologies constructives très différentes de par le monde (en Europe comme ailleurs). Ces inclusions en bois, appelées aussi bandes sismiques, servent à limiter la propagation des fissures, à dissiper de l'énergie sans conduire à la ruine du bâtiment en libérant les mouvements par étage et à aider au nivellement des murs lors de la fabrication. Mais si cela est clairement identifié, il faut aujourd'hui apporté des preuves scientifiques quantitatives de leur impact. C'est ce que nous proposons de faire. A titre d'illustration, nous avons déjà effectué quelques comparaisons entre un mur avec et un mur sans ces inclusions en bois en utilisant le mini-mur de réaction et de la corrélation d'images (Fig. 2.35).

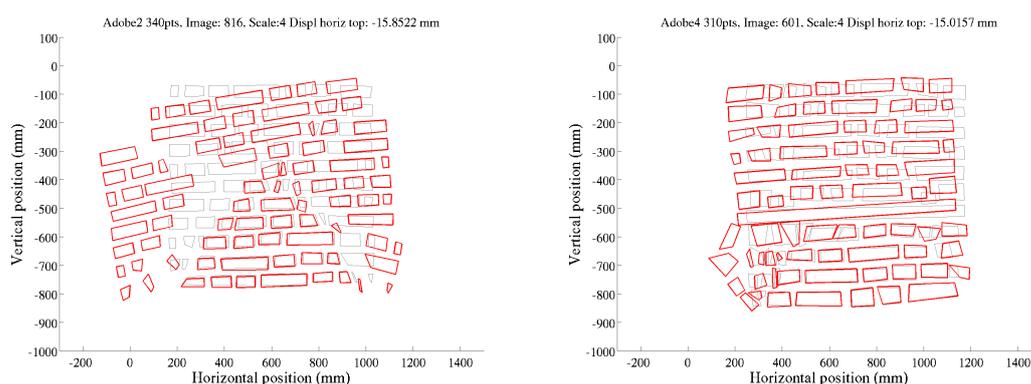


FIGURE 2.35 – Faciès de fissuration d'un mur en adobe avec ou sans inclusion

Enfin, afin d'étudier la vulnérabilité sismique des structures, le laboratoire 3SR vient de s'équiper depuis septembre 2015 d'une dalle d'essai permettant de tester des structures à l'échelle 1. Cette plate-forme d'essai contient actuellement un mur de réaction de 2,4 m de haut. L'une de mes activités actuelles est d'une part celles de la recherche de financement pour équiper cette dalle d'essai et d'une autre part celle de la conception de moyens d'essais afin de poursuivre

les recherches présentées dans ce chapitre. En particulier, je suis en train de développer une table vibrante de $2,5 \times 3,5$ m pouvant passer les mêmes types de séismes que ceux présentés ci-dessous avec des coefficients d'amplifications similaires (Fig. 2.36).

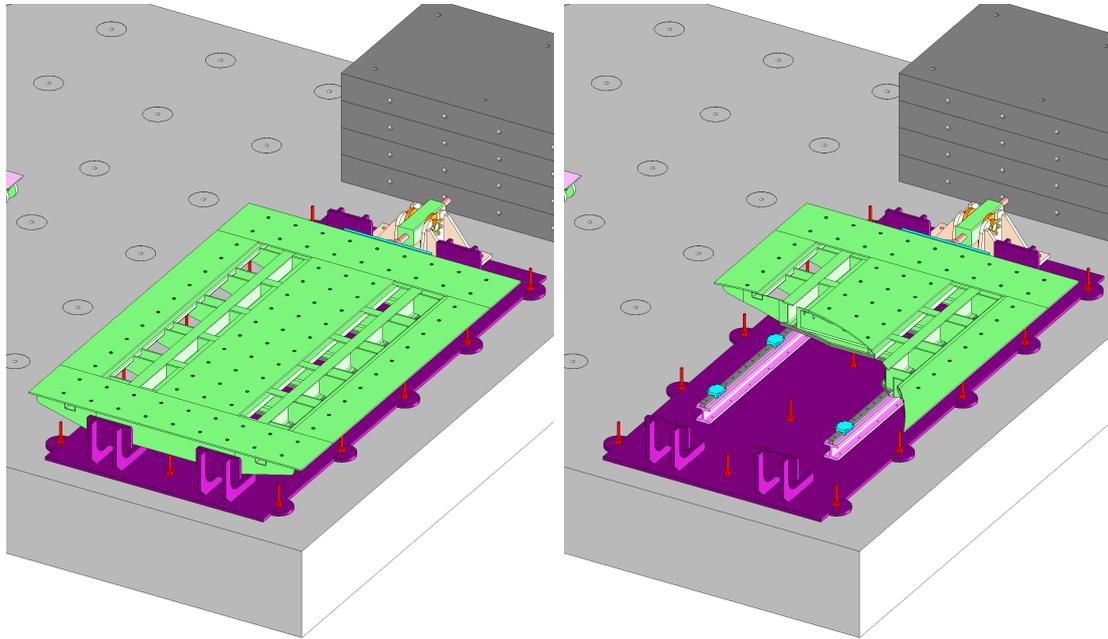


FIGURE 2.36 – Projet de table vibrante à 3SR

Chapitre 3

Opérationnel et interdisciplinarité

3.1 Introduction et objectifs

Au cours de mes activités d'enseignant-chercheur, j'ai eu la chance de participer à des projets de recherche mais aussi d'enseignement dont le cadre dépasse largement la recherche classique académique en sciences et technologies de l'ingénieur (STI). En particulier, j'ai participé à des projets en lien étroit avec les sciences humaines et sociales (STS) en collaboration avec des architectes. La composante interdisciplinaire m'a permis de mieux situer l'impact de mes recherches par rapport à la société civile et à ses attentes. Cela m'a aussi permis d'enclencher une recherche en adéquation avec mes convictions et ma volonté de participer au développement d'un monde plus soutenable, plus respectueux des générations futures (dans le sens du Rapport Brundtland, Organisation des Nations Unies, 1997). La recherche présentée au chapitre 2 n'aurait jamais pu avoir lieu sans cette étroite collaboration avec les STS et c'est pourquoi cette habilitation à diriger les recherches ne pourraient pas être totalement aboutie sans ce chapitre particulier. Il a pour objectif de souligner l'importance du travail interdisciplinaire pour mener une recherche à la fois de qualité et utile à la société de demain. C'est en tout cas dans ce cadre là que je compte poursuivre et que je candidate à pouvoir diriger mes prochaines recherches et mes activités pédagogiques.

Cloisonnement professionnel et dans l'enseignement supérieur entre architecte et ingénieur Génie civil

Contrairement aux autres pays européens, la formation ainsi que les tutelles de rattachement des architectes et des ingénieurs Génie Civil en France sont fortement dissociées : le ministère de la Culture pour les premiers, le ministère de l'Éducation, de la Recherche voire de l'Industrie pour les autres. Dès lors, les enseignants, les étudiants, mais aussi les formes et les contenus pédagogiques sont généralement très différents. Après la formation, dans le cadre de l'activité professionnelle, il s'en suit des schémas de fonctionnement spécifiques, bâtis sur les stéréotypes vivaces et fantasmatiques de l'architecte artiste, toujours en retard, qui conçoit du beau qui ne tient pas et de l'ingénieur qui construit du solide sans esthétique, focalisé sur les techniques de réalisation. Si la réalité quotidienne est loin d'être aussi caricaturale, les deux professions sont souvent en opposition et cela de façon mondiale. [Charleson et Pirie \[2009\]](#) analyse clairement cette situation grâce à une enquête menée en Nouvelle-Zélande entre 2004 et 2007. Les formations de l'enseignement supérieur ont une réelle mission à mener afin de permettre un dialogue plus apaisé et plus efficace. Pour cela, elles doivent proposer des collaborations effectives entre les deux disciplines afin d'améliorer d'une part, la compréhension des étudiants sur les missions et les difficultés de chacun et d'autre part, le résultat de l'objet final à la fois

en terme d'esthétisme que de stabilité.

De plus, les enjeux environnementaux actuels, par leur complexité et leur dimension globale, nécessitent aussi une réponse interdisciplinaire pour que la profession puisse proposer des solutions plus respectueuse de l'environnement. Là-encore, l'enseignement supérieur a un rôle moral à mener pour initier des transformations sociétales et un monde plus soutenable ([WaaS et al. \[2010\]](#)). Dans cette optique, plusieurs activités pédagogiques à travers le monde ont été mises en place ces dernières années et des numéros spéciaux dans des journaux scientifiques ont été consacrés à leur promotion ([Lozano García et al. \[2006\]](#) et [Haselbach \[2011\]](#)). En particulier, deux articles dans le dernier numéro spécial prouvent que les interactions multidisciplinaires ou interdisciplinaires permettent d'améliorer l'apprentissage des étudiants dans le domaine de la soutenabilité. Par la suite, je présenterai une activité pédagogique interdisciplinaire et innovante que j'ai mise en place à l'Université Grenoble Alpes. Puis, je présenterai aussi la partie interdisciplinaire mise en place au niveau de la recherche. En effet comme nous le verrons, la recherche ne peut plus non plus être cantonnée à un travail mono-discipline pour relever les défis actuels humanitaires et environnementaux. Mais au auparavant, je vais introduire de façon plus générale les enjeux actuels qui nécessite plus de travail collaboratif.

Thèses associées à ce chapitre

Marie de Guillebon, "Réemploi en architecture : vers un ajustement des modes de conception-production ? En-quête de (bon) sens", thèse de l'Université de Grenoble, école doctorale Sciences de l'Homme, du Politique et du Territoire (SHPT), thèse en cours et ayant commencé le 1 septembre 2015.

- Encadrant : Anne Coste (100%, Professeur Histoire et Cultures Architecturales).
- Mon implication : membre du comité de thèse.
- Sujet de recherche : Plutôt qu'une pratique de résistance, le réemploi en architecture peut être un outil de projet occasionnant une évolution du processus de conception et production. Cette thèse vise plus largement à comprendre et retrouver du bon sens dans la production architecturale en analysant les pratiques de réemploi selon trois types d'approches complémentaires : l'approche de la maîtrise d'œuvre, l'approche de la maîtrise d'ouvrage et l'approche pédagogique en architecture.

Annalisa Caimi, "Cultures constructives vernaculaires et résilience", thèse de l'Université de Grenoble, école doctorale Sciences de l'Homme, du Politique et du Territoire (SHPT), thèse soutenue le 8 avril 2014.

- Encadrant : Hubert Guillaud (Professeur Sciences et Techniques pour l'Architecture) et Philippe Garnier (Maître-assistant ENSAG).
- Mon implication : aucun rôle officiel. Cette thèse est en relation avec celle de Florent Vieux-Champagne et comme pour lui, elle est financée par l'ANR Flash ReparH. Bien que les deux thèses ont été dirigées respectivement dans leur discipline, de nombreuses interactions et conférences communes ont eu lieu.
- Sujet de recherche : ce travail de recherche explore le potentiel présenté par les cultures constructives vernaculaires dans le renforcement de la résilience locale. Deux axes sont développées. L'un investigue les dispositions et les dispositifs vernaculaires à caractère parasinistre ayant démontré leur efficacité à réduire la vulnérabilité de l'environnement construit envers différents types d'aléas naturels. L'autre axe questionne les modalités de leur identification et contribution directe au renforcement des capacités de populations et institutions dans la gestion des crises.

Publications associées à ce chapitre

[Sieffert et al. \[2014b\]](#) → Y. SIEFFERT, J.-M. HUYGEN, D. DAUDON «Sustainable construction with repurposed materials in the context of a Civil Engineering-Architecture collaboration», *Journal of Cleaner Production*, vol. 67, 2014, pp 125-138.

[Daudon et al. \[2014\]](#) → D. DAUDON, Y. SIEFFERT, O. ALBARRACÍN, L.G. LIBARDU, G. NAVARTA «Adobe construction modeling by discrete element method : first methodological steps», *Procedia Economics and Finance*, vol.18, 2014, pp 247-254.

[Caimi et al. \[2014\]](#) → A. CAIMI, F. VIEUX-CHAMPAGNE, P. GARNIER, H. GUILLAUD, O. MOLES, L. DAUDEVILLE, Y. SIEFFERT, S. GRANGE «Savoirs traditionnels et connaissances scientifiques pour une réduction de la vulnérabilité de l'habitat rural face aux aléas naturels en Haïti», *Field Actions Science Reports (FACTS)*, vol.9, 2014, pp 1-8.

Programmes pédagogiques et de recherche associés à ce chapitre

Subvention établissement (2008,2010,2011,2012,2013,2014,2015) : 10 keuros annuelle (en moyenne)

AGIR-PEPS 2016 (Alpes Grenoble Innovation Recherche) : Financement obtenu suite à l'appel à projet AGIR-PEPS, période 2016-2017, montant 50 keuros, porteur.

3.2 De nouveaux enjeux nécessitant la collaboration

3.2.1 La soutenabilité

Nous sommes actuellement à une époque charnière par rapport à l'environnement et à sa dégradation irréversible. Cette prise de conscience fait partie de notre quotidien et est partagée aujourd'hui par tous. La communauté scientifique internationale est à l'origine de la découverte du changement climatique initié par l'homme. Elle a ensuite été relayée et portée par les représentants politiques de l'ensemble des pays qui se réunissent régulièrement sur le thème du défi du climat sous l'égide des Nations Unies (citons par exemple la COP 21 de Paris (2015), le protocole de Kyoto (1997) et la convention de Rio (1992)). Les journalistes et les médias ont aussi été un vecteur d'information sur cette question et actuellement, de façon pratiquement quotidienne. Enfin, certaines personnalités médiatiques se sont engagées pour "sauver la planète" : Pierre Rabhi (philosophe paysan), Cyril Dion et Mélanie Laurent (réalisateur du film "Demain", sortie en 2015), Nicolas Hulot (journaliste-reporter), Yann Arthus-Bertrand (photographe et journaliste), Albert Arnold Al Gore (homme politique américain).

À l'échelle mondiale, l'industrie de la construction est sans aucun doute l'industrie la plus consommatrice de matières premières et la plus destructive au niveau de l'environnement. Chaque année, la construction représente 40% du flux total de matières premières dans l'économie mondiale - environ 3 milliards de tonnes. Or la pénurie annoncée de matières premières (sable, ciment, métaux, ([Goodall \[2011\]](#)) ne permet plus le *statu-quo* mais nécessite d'une part une vraie prise de conscience de l'industrie de la construction et d'autre part un renouvellement de ses pratiques afin d'enclencher un nouveau cercle vertueux et respectueux de l'environnement. L'université, par sa mission de formation, doit être l'incubateur d'une réelle innovation soutenable, multicritère et globale. De plus, comme l'État, l'Université se doit d'être

exemplaire ¹.

Actuellement, le discours écologique est usuellement détourné de sa quintessence, pour maintenir le système marchant classique. En effet, la conception du “développement durable” dans le bâtiment est régie par des règles assurant une diminution d’énergie consommée lors de l’exploitation du bâtiment et aboutissant à des labels, comme le BBC (Bâtiment à Base Consommation). Pour autant, cela ne garantit ni l’économie de matière première, ni celle de l’énergie. Bien au contraire, le bilan peut être défavorable (Thormark [2006], McDonald et Pearce [2010]) puisque pour diminuer la consommation d’énergie pendant l’exploitation d’un bâtiment, on augmente drastiquement la quantité de matière permettant d’assurer une étanchéité à l’air, à l’eau ou la production d’énergie. A titre d’exemple, c’est le cas des cellules photovoltaïques et des éoliennes qui nécessitent une dizaine d’année pour que leur production d’énergie puisse combler “la dette” d’énergie de leur fabrication (Jelle *et al.* [2012], Lu et Yang [2010]). Ceci illustre aussi l’importance du champ de recherche sur le cycle de vie des matériaux, qui seul peut donner les indicateurs sur la soutenabilité d’un matériau ou d’un principe constructif (désassemblage, réparabilité, réversibilité). Cependant, les labels, bien qu’assurant une construction conventionnelle sur la consommation des matériaux, installent une réelle prise de conscience des enjeux environnementaux et sur la nécessité de faire autrement. Indubitablement, aucun choix ne nous sera plus possible dans un avenir proche, puisqu’à force de consommer la terre, ses richesses minérales et biologiques s’amenuisent, de façon irrémédiable et accélérée (Bourg et Whiteside [2009]). Il est donc clair que la soutenabilité, par sa complexité et par sa nécessité de changer nos modes de pensée classique, exige la pluridisciplinarité afin de traiter la construction dans sa globalité et non à l’échelle de disciplines hiérarchisées. En effet, architectes et ingénieurs doivent travailler ensemble afin d’aborder dès la phase d’avant projet de toutes constructions les questions liées aux usages, aux confort, aux matières premières dépensées, à l’énergie consommée, à la pollution engendrée, aux transports, aux appropriations, à la santé, à la sécurité, aux bonheurs, etc. Ainsi, le nouveau défi de la construction de demain ne sera pas de réaliser des constructions de plus en plus hautes ou de plus en plus rigides, capables de résister aux changements climatiques et à l’accroissement de l’amplitude et de la fréquence des catastrophes naturelles (conséquence de l’impact humain), mais il sera de construire en économisant la matière et en réutilisant les matériaux déjà à notre disposition. Le nouveau paradigme sera de considérer la durabilité au niveau de la matière première et non au niveau des structures, autorisant leur ruine pourvu qu’elles garantissent que les éléments, constitués des matières premières dont les ressources s’épuisent, soient réutilisables sans apport de nouveau matériau. Par là même, ceci favorise une construction cyclique et frugale.

3.2.2 Les méfaits de la mondialisation

Le béton armé, une solution pas toujours adaptée

La mondialisation a totalement modifiée le domaine de la construction et cela en une seule génération. Son média universel est le matériau béton qui, par sa simplicité de mise en œuvre s’est imposé comme la solution à la plupart des projets architecturaux. Le mouvement moderne, avec en France l’architecte Le Corbusier, a aussi contribué à la promotion du béton armé afin de modifier notre façon d’habiter. Enfin, la nécessité de reconstruire l’Europe après la Seconde Guerre mondiale a définitivement mis le matériau béton sur un piédestal, permettant par la standardisation de réduire les coûts grâce à une production de masse. La reconstruction a aussi

1. circulaire du 3 décembre 2008 relative à l’exemplarité de l’État au regard du développement durable dans le fonctionnement de ses services et de ses établissements publics

permis d'inclure les progrès en matière d'hygiène ce qui a largement participé à la connotation de modernité véhiculée par ce matériau.

Aujourd'hui, sa suprématie mondiale est toujours actuelle mais son impact environnemental ne peut plus être négligé et cela pour deux raisons. La première concerne la problématique des ressources en matières premières qui ne sont pas infinies : le ciment et le sable. A titre d'exemple, l'extraction du sable pour le domaine de la construction est réellement problématique car elle conduit à un désastre écologique et humain, en particulier lorsqu'il est extrait du fond des mers (destruction de l'écosystème) ou proche du littoral (destruction de la barrière naturelle protégeant les côtes qui se mettent à reculer) (Delestrac [2013]). D'autre part, la fabrication du ciment est énergivore, et la production du clinker son principal constituant, est responsable d'approximativement 7% des émissions de gaz à effet de serre (GES) (CDC [2014]).

Au niveau international et sans vouloir stigmatiser le matériau béton, son impact direct ou indirect est à considérer dans l'analyse de l'intensification et l'augmentation des risques provenant des catastrophes naturelles qui résultent à la fois du changement climatique, d'une urbanisation incontrôlée, d'une croissance démographique et d'un exode rural. De plus, comme le montre la Fig. 3.1, ces catastrophes mondiales sont de plus en plus meurtrières et coûteuses ; il faut donc faire évoluer les pratiques de la profession lors des opérations de reconstruction. Actuellement, une réponse internationale "clef en main" d'un modèle d'habitat, comportant du béton armé ou des produits à base de ciment, c'est imposée dans l'ensemble des projets de reconstruction. L'une des conséquences est l'abandon et le rejet par les populations elles-mêmes des cultures constructives locales, alors qu'elles ont très souvent des qualités indéniables, tant techniques que sociales et culturelles. De plus le modèle d'habitat unique, basé sur le matériau béton et provenant des pays développés, n'est souvent pas adapté aux contraintes locales lors de projet de reconstruction des pays en voie de développement et cela pour différentes raisons :

- au niveau matériau : le ciment n'est pas un matériau disponible localement et son utilisation nécessite une importation massive. Ceci conduit à une augmentation de l'impact carbone. De plus, certaines zones à reconstruire ne sont pas facilement accessibles et ne peuvent être alimentées à un coût raisonnable en matériaux non locaux. Enfin, le ciment crée une dépendance économique envers les fournisseurs et empêche les pays à recréer son activité économique de façon autonome. Le ciment n'est donc pas un vecteur de résilience.
- au niveau de la réalisation : le béton armé nécessite une qualité de réalisation et de mise en place qui ne sont généralement ni comprises ni possibles au vue des capacités des populations locales. Les deux images de la figure 3.2, présent en décembre 2014 à Port-en-Prince soit pratiquement 4 ans après le séisme de 2010, montrent clairement que le béton réalisé et le dimensionnement des armatures sont inadéquates sur ce projet de reconstruction.

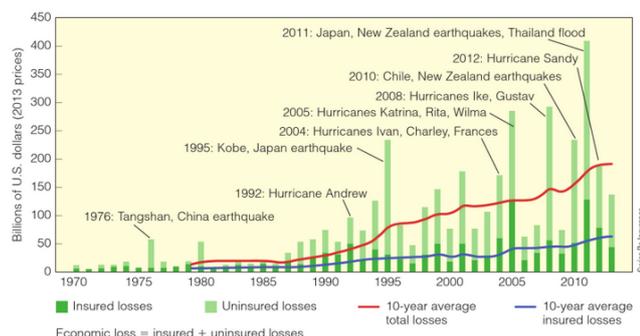


FIGURE 3.1 – Augmentation des coûts des risques naturels, d'après Hyndman et Hyndman [2015]



FIGURE 3.2 – Port-au-Prince, reconstruction décembre 2014

— au niveau du retour d'expérience : les structures en béton armé sont connues pour être très sensibles aux sollicitations sismiques si elles ne sont pas construites de façon adéquate (dimensionnement par des ingénieurs structures, réalisation suivant les règles de l'art, détails soignés, travailleurs formés et compétents, suivie de la qualité de réalisation et de sa conformité). Or ceci est difficilement obtenu dans les pays en voie de développement ce qui explique que les constructions en béton armé aient mal résisté lors des récents tremblements de terre. L'exemple d'Haïti est particulièrement pertinent puisque la plupart des constructions en béton armé ont subi des dommages très importants, ce qui explique le nombre très élevés de mort (approximativement 10% de la population dans la capitale). En effet, ces constructions, qu'elles soient réalisées sans (ce qui représente 90% des constructions) ou avec l'appui d'architecte ou d'ingénieur, ont toutes été réalisées sans aucun dimensionnement aux risques sismiques du fait de l'absence de cette compétence dans le cursus universitaires de ces deux professions. Ainsi, même les structures ayant eu recours à des architectes ou des ingénieurs comme les écoles, les hôtels, les hôpitaux et même la cathédrale ont été détruites (Fig. 3.3a). En résumé, le matériau béton ne peut pas être considéré comme la solution idéale à tout projet de (re)construction. Cependant, il a aussi des avantages incontestables comme par exemple la rapidité d'exécution, la standardisation, sa haute résistance permettant des projets gigantesques (en particulier des Ouvrages d'Art comme les piles du pont de Millau), sa bonne tenue au feu et au séisme lorsque les règles de l'art sont respectées, sa durabilité (y compris en milieu agressif), etc. Il est donc important de poursuivre son utilisation lorsque cette dernière est justifiée.

Culture constructive locale, intelligence constructive

Les cultures constructives locales, qui proviennent d'une réponse empirique à la réalisation d'habitat en milieu contraint par des sollicitations naturelles, ont aussi toutes leur légitimité. En reprenant notre exemple d'Haïti et en croisant en plus les disciplines, [Paultre et al. \[2013\]](#) (qui sont des ingénieurs) et [Audefro \[2011\]](#) (qui est architecte) font le même constat : les constructions traditionnelles en ossature bois, bien que souvent en mauvais état du fait d'un manque d'entretien, de modification non adéquate et des dommages dus aux termites, ont particulièrement bien résisté au séisme de 2010. Cependant, elles ne représentent que 18% du bâti et sont principalement présentes (à 92,5%) dans les zones rurales. En zone urbaine, elles sont principalement connues sous la forme du style architecturale des "gingerbread" (Fig. 3.3b).



FIGURE 3.3 – Haïti : deux structures à Port-au-Prince. D'après [Paultre et al. \[2013\]](#)

De façon générale, les constructions traditionnelles ne sont pas mieux construites que celles en béton et leur réalisation est parfois de qualité médiocre. Cependant, elles résistent beaucoup mieux. Cela a été mis en évidence lors des deux séismes de 1999 en Turquie (celui du 17 août avec $M_w=7,4$ et celui du 12 novembre avec $M_w=7,2$) à travers différents articles. [Gülhan et Güney \[2000\]](#) ont conduit une recherche statistique détaillée dans différentes zones de deux districts (Kocaeli and Sakarya) particulièrement touchés par les séismes de 1999. Sur un échantillon représentatif de 2618 bâtiments en structure traditionnelle et 7500 en béton armé, ils montrent que les bâtiments en structure traditionnelle ont bien mieux résisté avec seulement 15% de bâtiments très ou modérément endommagés contre 57% pour ceux en béton armé. Ceci est retranscrit sur la figure 3.4 provenant d'une compilation personnelle de leur étude.

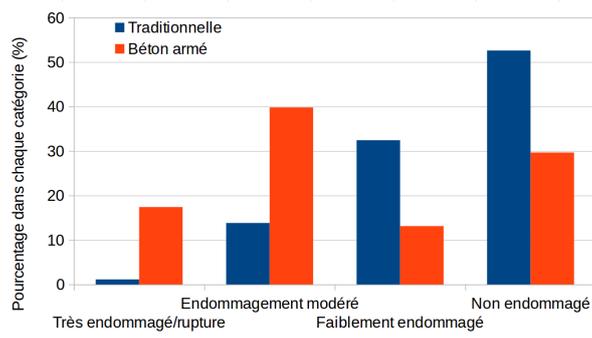


FIGURE 3.4 – Pourcentage de structure traditionnelle ou en béton armé suivant l'endommagement. Compilation des données provenant de [Gülhan et Güney \[2000\]](#)

A titre d'illustration les figures 3.5 et 3.6 provenant de [Langenbach \[2008\]](#) et [Doğangün *et al.* \[2006\]](#) montrent, sur les mêmes sites, la rupture de bâtiments en béton armé alors que les bâtiments en construction traditionnelle ne sont pas endommagés. Cependant, les conclusions doivent être nuancées car si les constructions traditionnelles résistent mieux que les constructions en béton armé, la hauteur des bâtiments (et donc le nombre d'étages) n'est pas identique. Les structures en béton armé sont ici bien plus hautes et donc bien plus sollicitées par les séismes. Mais le matériau béton armé n'est pas uniquement utilisé pour les structures de type immeubles collectifs. La plupart du temps, il est aussi utilisé dans les bâtiments individuels, de faible hauteur (principalement 1 étage) comme illustrés par la Fig. 3.7 montrant un quartier de Port-au-prince, entièrement en béton armé et dont 90% des maisons ont été détruites.



Ruine d'un bâtiment en poteau-poutre BA, Gölcük, Turkey, 1999



Maison non détruite de type hıms, Gölcük, Turkey, 1999

FIGURE 3.5 – Turquie : deux structures à une rue de distance. D'après [Langenbach \[2008\]](#)



FIGURE 3.6 – Turquie : deux exemples de deux structures adjacentes. D’après [Doğangün et al. \[2006\]](#)

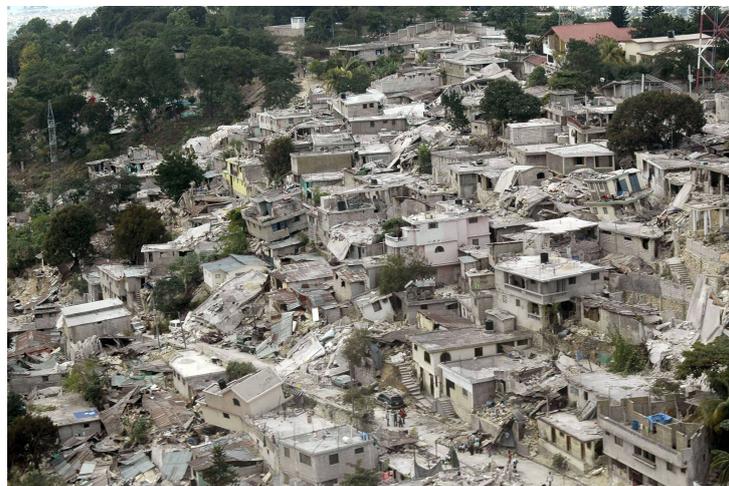


FIGURE 3.7 – Haïti, Port au prince, 2010. D’après la Fédération International de la Croix-Rouge et du croissant-Rouge (<https://www.flickr.com/photos/ifrc/4273274509/in/gallery-vaughndewar-72157623210861638/>)

3.3 Collaboration interdisciplinaire opérationnelle et recherche

Comme nous venons de le montrer, la (re)construction en zone de catastrophe naturelle exige aussi la pluridisciplinarité afin d’élaborer des stratégies permettant d’une part, d’assurer l’héritage culturel et les spécificités des matériaux locaux disponibles dans les territoires soumis aux catastrophes naturelles et d’autre part, de réaliser des (re)constructions en accord avec les capacités techniques et économiques des populations locales. En cela, le travail présenté dans le chapitre 2 illustre parfaitement cette nécessité. En effet, la recherche que nous avons menée a été faite en étroite collaboration entre chercheurs en architecture et en Génie Civil avec une implication constante des deux corps de métier sur l’ensemble des sujets, que cela soit au niveau du développement d’une résilience communautaire qu’au niveau de la qualification parasismique d’une structure innovante basée sur les cultures constructives locales. A

titre d'illustration, l'organisation du travail collaboratif interdisciplinaire que nous avons mis en place se décline ainsi (pour un territoire donné) :

- analyse des typologies constructives,
- analyse des usages et du fonctionnement socio-économique,
- synthétisation du fonctionnement, des besoins et des interventions possibles,
- ressources disponibles localement et filière de matériaux,
- choix d'une intervention donnée
- essais expérimentaux mécaniques et modélisation numérique du comportement des structures,
- formation des constructeurs (maçons, artisans) et implication de la société civile en vue d'une appropriation,
- analyse de l'évolution de la solution retenue par les bénéficiaires,
- changement d'échelle au niveau de l'intervention (du local au global).



a) Maison rurale (EPPMPH)



b) Maison rurale (EPPMPH)



c) Maison rurale (Concert Action)



d) Maison rurale (Gadru)

FIGURE 3.8 – Projets de reconstruction

Ce travail interdisciplinaire entre Sciences Humaines et Sociales (SHS) et Sciences et Technologies de l'Ingénierie (STI) a permis de promouvoir une solution d'habitat adéquat à la reconstruction d'Haïti, en accord avec les capacités locales (techniques et économiques) et reconnue par l'administration haïtienne. En effet, grâce à ce travail de recherche, nous avons obtenu en mai 2012 une certification sur le principe constructif présenté au chapitre 2 par le

ministère des Travaux Publics, Transports et Communications (MTPTC) et qui autorise donc son utilisation en Haïti. En complément à notre travail de recherche académique classique, nous avons été associés à des missions opérationnelles de la reconstruction en Haïti en lien avec des organisations humanitaires (Entrepreneurs du Monde, réseau Paded, Concert-action, Misereror, EPPMPH (Encadrement des Petits Paysans des Mornes et des Plaines de Haïti), Gadru, etc). C'est ainsi que 1 000 logements ont été construits ou réhabilités avec notre appui (Fig. 3.8). Mais le plus grand succès de notre projet est dans son appropriation par la population locale. En effet, grâce à notre intervention et à la formation de maçons et de villageois, 2 000 logements ont été construits par les haïtiens sans aucune intervention de notre part. Cela prouve que nous avons réussi à véhiculer une image positive de ce type de construction envers la population locale qui a aussi compris l'intérêt de l'utiliser (facilité de mise en place, coût réduit en matière première, comportement adéquat en cas de séisme, etc).

Enfin, le principe constructif étudié au chapitre 2 a aussi été repris pour la réalisation de bâti de même typologie mais comportant un étage et cela en zone urbaine ou en zone rurale avec la construction d'une école (Fig. 3.9). Ce système constructif n'est donc pas limité à un bâtiment sans étage et répond donc parfaitement aux usages du bâti des Haïtiens de Port-au-Prince qui, comme nous l'avons vu à la Fig. 3.7 comporte généralement un étage.



a) Maison urbaine construite à Port-au-Prince
(Entrepreneurs du Monde)



c) École rurale construite à Grand Boulage,
(Entrepreneurs du Monde)

FIGURE 3.9 – Projets de reconstruction avec 1 étage

Voilà pourquoi je compte poursuivre ce type de recherche, éco-responsable et réellement basée sur les 3 piliers du développement soutenable :

- en accord avec les capacités économiques locales,
- en accord avec l'évolution de la société pour assurer son autonomie et sa résilience,
- en accord avec les ressources en matières premières locales.

Formation initiale, une évolution à mettre en place

A travers le monde, le système éducatif des ingénieurs Génie Civil ou des architectes focalise principalement sur les constructions en béton armé. Ceci est bien évidemment en corrélation avec l'activité commerciale de la construction qui utilise principalement ce matériau. A titre personnel, j'ai écrit un ouvrage pédagogique sur le dimensionnement des structures en béton

armé (Sieffert [2014]). Il est indéniable que le béton armé est une matière importante pour les ingénieurs et les architectes. Cependant, même si d'autres matériaux sont aussi étudiés pendant leurs cursus (principalement l'acier et le bois), les constructions traditionnelles ne sont pratiquement jamais abordées. Si les acteurs du monde de la construction de demain ne sont pas sensibilisés à ce type de construction, comment pourraient-elles avoir une légitimité ? Les constructions alternatives au béton armé doivent être introduites dans leur cursus et leur utilisation encouragée et cela dans les pays en voie de développement comme dans les pays développés.

Comme nous l'avons vu, les structures traditionnelles résistent souvent mieux aux sollicitations sismiques que les constructions en béton armé de mauvaise qualité. Cependant, dans les deux cas, les constructions individuelles sont effectuées par les propriétaires eux-mêmes qui pour la plupart n'ont pas de connaissance des règles de l'art et de la résistance des structures. Il est donc certain que l'ingénieur peut apporter une amélioration substantielle de la qualité des constructions traditionnelles et de leurs durabilités. Pour cela, il faut les former.

Cependant, la formation ne doit pas être élitiste en se focalisant uniquement sur les ingénieurs et les architectes. Ce qui a été mis en exergue avec la recherche que nous avons menée en Haïti est qu'il est aussi important de former les maçons, les paysans et les citoyens de façon générale afin de sauvegarder les cultures constructives locales (vernaculaires ou non). Actuellement, la connaissance ancestrale est en voie de disparition car l'introduction de nouveaux matériaux et de nouvelles pratiques exogènes ont modifié les modalités de transmission des savoirs élaborés empiriquement dans les constructions vernaculaires. Avec ces changements, les artisans traditionnels se retrouvent de plus en plus incapables d'utiliser leurs compétences, se retrouvant en même temps incapables d'utiliser ces nouveaux matériaux ; leurs connaissances traditionnelles dégénèrent ainsi de manière considérable et les générations successives ne sont plus en mesure d'apprendre de leurs maîtres (Jigyasu [2008]). Notre recherche, associée à l'opérationnel, doit accompagner la réappropriation des techniques et des cultures constructives locales mais non pas de façon figée (statique) mais en incorporant le caractère dynamique du vernaculaire dérivant de transformations continues provenant d'assimilation de nouveaux savoir-faire et d'adaptation à des nouveaux besoins. Dans les pays en développement, le risque est fort concernant la perte des savoirs locaux. Dans les pays développés, les constructeurs ont perdu la connaissance et souvent même le droit légal de réaliser des constructions provenant des cultures constructives locales. L'enjeu en STI sera de créer des normes permettant la rationalisation de leur construction aux 21^{ème} Siècle. C'est tout un champ de recherche qui reste à explorer.

3.4 Collaboration interdisciplinaire opérationnelle et pédagogique

Comme nous venons de le montrer, il est important de développer des collaborations entre architecte et ingénieur/master de Génie Civil afin de relever les nouveaux défis actuels. Afin qu'elle soit le plus efficace possible, il est nécessaire que la collaboration soit mise en place dès l'enseignement supérieur. Mais nous devons aller plus loin : l'Université doit aussi s'ouvrir à la société civile et lorsque des étudiants architectes et ingénieurs/master de Génie Civil travaillent ensemble, il est pertinent d'associer à la formation de la production opérationnelle pour la société. Ces deux aspects seront développés ci-dessous.

3.4.1 Favoriser le travail collaboratif

Dans l'optique de développer une collaboration entre architecte et ingénieur/master de Génie Civil et alors que je prenais la responsabilité de créer le master 2 Génie Civil et Infrastructure de l'Université Grenoble Alpes (à cette époque l'Université Joseph Fourier) en 2007, j'ai sollicité les enseignants de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (ENSAG) afin de créer une unité d'enseignement commune s'intitulant "Conception Collaborative & Construction". L'objectif était double : d'une part augmenter la collaboration entre architecte et ingénieur/master de Génie Civil en leur apprenant à travailler ensemble et à se connaître dès leurs études supérieures ; et d'autre part concevoir des projets de construction soutenable et éco-responsable. Jean-Marc Huygen, enseignant à l'ENSAG, a été très enthousiaste par le projet. La première année, cette collaboration pédagogique a eu lieu de façon classique, en salle et sur papier. Les étudiants devaient concevoir ensemble, dès les esquisses, un projet de construction répondant aux attentes des deux disciplines. Bien que cette première expérience fut très enrichissante au niveau pédagogique, nous avons aussi constaté que la collaboration entre les étudiants restait assez limitée car les emplois du temps des deux disciplines étaient difficilement compatibles pour le travail personnel de groupe et surtout car les étudiants avaient conservé une répartition des rôles classiques entre les deux disciplines, l'ingénieur/master attendant les esquisses des architectes pour faire ensuite le dimensionnement des éléments structuraux. Pour accroître le travail collaboratif, nous avons alors décidé d'ajouter une dimension d'atelier intensif à notre activité pédagogique. L'idée était de faire travailler et vivre ensemble les étudiants pendant 10 jours consécutifs sur un même lieu et d'ajouter les composantes réalisation et expérimentation en vraie grandeur au projet de construction. Cette unité d'enseignement, qui existe sous la forme d'atelier intensif depuis 2008, a finalement 8 objectifs présentés ci-dessous :

- améliorer la relation et l'efficacité de la conception entre architecte et ingénieur/master en Génie Civil,
- faire prendre conscience de l'impact de la construction sur l'environnement et apporter des solutions simples qui passent par l'optimisation et l'économie de matière comme de l'énergie,
- ouvrir les étudiants à d'autres façons de construire et à d'autres matériaux bio-sourcés (bois, paille, chanvre, terre, etc). Tant que les architectes et les ingénieurs/masters ne seront formés qu'au béton armé et à la construction métallique, les autres matériaux resteront cantonnés à une utilisation occasionnelle,
- passer de la conception à la réalisation afin de ne jamais oublier que l'expérimentation fait habituellement ressortir des problèmes de stabilités que les logiciels de calcul ne prennent pas forcément en compte,
- assumer la responsabilité du constructeur par rapport à l'acte de construire, que cela soit par le message architectural que par les questions de sécurités des usages prévisibles,
- juger de ces forces (intellectuelles comme physiques) pour respecter les délais et le planning,
- anticiper les difficultés techniques et apprendre à trouver des solutions en étant force de proposition,
- communiquer avec différents types de publics (enseignants, élus, citoyens, enfants).

Pour des questions budgétaires d'une part mais aussi pour stimuler les étudiants à être à la fois créatif et ingénieux, nous avons décidé de travailler avec des matériaux de réemploi, glaner à proximité des lieux de constructions ou de résidences des étudiants. Le réemploi des matériaux en construction n'est pas un concept nouveau. C'est le quatrième "R" dans la déclinaison Réduire, Recycler, Réutiliser. Ces matériaux sont des objets ou parties d'ouvrages tombés en désuétude et abandonnés par leur propriétaire. Ils sont récupérés pour un nouvel usage, dif-

férent de celui pour lequel ils avaient été fabriqués, ce qui fait sa spécificité par rapport à la réutilisation. Le réemploi des matériaux, réalisé avec humilité, modifie le moins possible l'objet initial : par respect de la mémoire d'usage qu'il contient (la trace des utilisations antérieures) ; pour conserver l'énergie et les matières premières consommées lors de sa fabrication et éviter de nouvelles consommations ou pollutions. Fréquemment utilisé dans le milieu artistique, le réemploi d'objets permet de détourner leur sens premier et de créer une nouvelle dimension poétique. En architecture, un chapiteau romain récupéré a pu devenir chapiteau d'église ou - plus intéressant car cela occasionne, par glissement de sens, deux niveaux de lecture - pied de colonne voire soubassement de mur. En situation de pauvreté, la récupération permet de "subsister malgré tout" (fouiller dans les poubelles pour manger ou se protéger du froid) mais, très vite, le regard des autres et le souci de dignité conduisent à chercher "le beau". Les objets récupérés participent alors à un assemblage d'objets, constituant un nouvel objet signifiant : on passe là de la simple récupération au réemploi.

Ces matériaux sont particulièrement intéressants pour accroître la collaboration interdisciplinaire car aucune des 2 disciplines n'a réellement de repère pour leur utilisation, ce qui assure une équité devant le défi de construire avec ces matériaux. L'enveloppe ne prime pas ici sur l'acte architecturale car les formes sont difficiles à ériger. L'architecte est obligé de se concentrer sur le sens, sur l'assemblage des éléments et sur les différentes échelles de perception de l'objet construit. Les calculs de résistance des structures et les normes sur les matériaux sont difficilement transposables sur ces matériaux hétéroclites et ayant eu un passé inconnu de sollicitation. L'ingénieur est obligé d'être inventif pour utiliser ses connaissances sur ces matériaux mal connus.

Depuis 2008, sept ateliers intensifs ont eu lieu dans 3 villes différentes (Liège, Marseille, Barjols) et se déroulent sur 10 jours consécutifs. Entre 50 à 60 étudiants sont présents sur ces ateliers. Des équipes mixtes de 8 étudiants sont composées dès le premier jour. Les deux premiers jours sont consacrés aux intentions de projets, à l'observation des usages et au relevé des matériaux disponibles. Les deux jours suivants donnent lieu à la détermination des projets des équipes avec une présentation à l'ensemble des étudiants et aux encadrants. Les deux jours suivants sont consacrés à la détermination des systèmes constructifs qui sont testés sur des prototypes créés par les étudiants. Les 4 derniers jours permettent de passer des plans et des prototypes à la réalisation finale des structures. Lors du dernier jour, une inauguration est réalisée avec des élus et des citoyens grâce à une communication sur l'événement. Les figures [3.10](#), [3.11](#) et [3.12](#) présentent quelques réalisations.



FIGURE 3.10 – Constructions dans le quartier historique du centre de Liège



FIGURE 3.11 – Constructions sur le site la friche la Belle de Mai



FIGURE 3.12 – Constructions à Barjols

3.4.2 Université et société

En France, les effectifs d'étudiants à l'Université explosent dans les années 1960 dus aux effets du *baby boom*. De nouveaux centres universitaires sont créés à Paris et en province pour tenter de faire face à cette situation. Au cours de cette décennie, l'État crée les premiers campus à

la française, sur le modèle américain. Pour des questions d'accessibilité du foncier, la plupart du temps, ces campus universitaires sont créés en périphérie des villes. Ainsi, l'Université se délocalise des centres villes et par là même, s'éloigne de la société civile. Les campus deviennent une ville dans la ville, avec ces propres services. Aujourd'hui, le constat est fait que les campus universitaires sont refermés sur eux-mêmes et sans réel porosité avec les habitants des villes qui les accueillent : ne viennent sur le campus uniquement les étudiants, les personnels des universités et les employés des services associés. Ce cloisonnement a aussi contribué à une perte de reconnaissance du métier d'enseignant-chercheur ou de chercheur par la société civile. L'Université doit donc aujourd'hui se repositionner et réinitialiser des liens économiques, culturels mais aussi sociétaux avec son territoire d'influence afin d'être ce que les anglo-saxons nomme *civic university* et qui peut se traduire par Université citoyenne ([Annette \[2010\]](#) et [Goddard et Vallance \[2013\]](#)). En particulier l'Université par son caractère innovant doit être une force de proposition pour transformer la société et l'accompagner dans son évolution soutenable. Sa mission de formation doit aussi dépasser le simple cadre de ses étudiants pour s'ouvrir à la société tout entière, en passant par une vulgarisation de ses recherches et enseignements. Ouvrir les campus, c'est créer une attractivité pour faire entrer la société civile dans les campus mais c'est aussi proposer à l'Université de sortir du campus, par des actions "hors les murs".

Le Génie Civil est par sa quintessence lié à la société civile. Partant de ce constat, que pouvons-nous proposer ?

Rural Studio

Cette question n'est pas nouvelle et les pionniers dans le domaine de l'architecture commencent à travailler dans les années 80 sur la possibilité de construire de façon totalement soutenable pour la planète en associant la formation pédagogique au service de la société ([Pawley \[1982\]](#)). Puis, depuis les années 90, une activité pédagogique exemplaire apparaît à l'Université de Auburn (the School of Architecture, Planning, and Landscape Architecture). Son fondateur, Samuel Mockbee met en place le *Rural Studio* qui consiste à former des étudiants en architectes en associant :

- l'économie de matériaux afin d'obtenir des projets architecturaux à très bas coût,
- le passage de la conception à la réalisation afin que les étudiants soient réellement formés à toutes les étapes d'un projet d'architecture,
- des populations défavorisées dans le sud de l'Alabama afin de produire leur nouveau logement en accord avec leur usage.

Plus de 25 ans plus tard, cette activité pédagogique est toujours active et contribue à améliorer de façon sensible la qualité de vie de cette partie de l'État d'Alabama tout en permettant aux étudiants de devenir des *citizen architects*' ([Oppenheimer Dean et Hursley \[2002\]](#), [Oppenheimer Dean et Hursley \[2005\]](#) et [Freear et al. \[2014\]](#)).

La Fig.3.13 présente quelques exemples des réalisations effectuées par *Rural Studio* et qui m'ont convaincu que l'Université et les formations de Génie Civil devaient s'ouvrir à la société civile afin d'associer formation et utilité pour la société.

FIGURE 3.13 – Exemple de réalisation de *Rural Studio*

Université citoyenne

D'envergure moins importante mais dans la même philosophie, une action est actuellement menée. A titre expérimental, avec l'un de mes partenaires architectes de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Marseille, nous avons créé une Université Populaire dans la communauté de commune de Barjols (dans le Var). Ce lieu a été choisi car touché de plein fouet par la désindustrialisation, une attente importante de la population existe pour redynamiser son territoire, en accord avec sa culture et son patrimoine écologique. C'est ainsi que l'Université populaire de Barjols des Arts du Territoire (UBAT) a été créée en 2013 par 5 institutions et collectivités (ENSAG, UGA (initialement UJF), la Communauté de communes Provence d'Argens en Verdon, la Mairie de Barjols, la Maison régionale de l'eau, le Conseil régional de la région PACA, le Conseil général du département du Var). Lors de sa déclaration à la sous-préfecture de Brignoles, son objet était : "favoriser l'autonomie et l'épanouissement des personnes et des choses ; permettre à tous (toutes) d'accéder à l'éducation et la culture afin que chacun participe à la construction d'une société durable ; en plus des connaissances, l'objectif est de développer la préservation des ressources et la mise en pratique par toute personne intéressée ou dont l'art repose sur la matière." Dans le cadre de cette Université Populaire nous produisons les ateliers intensifs de réemploi présentés ci-dessus qui sont ouverts à nos étudiants mais aussi et sans aucune discrimination à toute personne intéressée. Et cela fonctionne ! Une vraie collaboration s'est mise en place avec des citoyens désirant à la fois se former mais aussi apporter leur propre expertise et intelligence provenant de leur expérience sur la construction écologique. C'est ainsi qu'est né au sein de l'UBAT mais sans notre intervention directe le "croc-aux-livres" présenté à la figure 3.14. Cette "bibliothèque", réalisée sur la place centrale du village est constituée uniquement de matériau de réemploi. Elle permet aux habitants de déposer et d'emprunter des livres, en toute liberté et sans contrainte : il n'est pas nécessaire d'être abonné et aucune obligation de déposer ou de rendre un livre n'est imposée pour pouvoir emprunter. De notre point de vue, cet exemple est une double réussite car les Barjolais ont été capables de s'approprier les concepts de construction en réemploi pour créer le "croc-aux-livre" et proposer un service public en dehors de nos actions et de plus cette construction est acceptée et respectée par les villageois.



FIGURE 3.14 – Le croc-aux-livres

3.5 Conclusion et perspectives

Ce chapitre a souligné le travail interdisciplinaire en architecture et en ingénierie du Génie Civil que j'ai mené ces dix dernières années. Il a montré l'importance de ce dialogue entre disciplines afin d'analyser les enjeux sociétaux de façon globale et non de façon disciplinaire. Il tend à indiquer une démarche de collaboration possible et qui a fait ses preuves, tant du côté pédagogique que du côté recherche. Il a aussi montré l'impact de ce type de démarche pour proposer des solutions pérennes et permettant la résilience des communautés lors d'opération de reconstruction. La soutenabilité dans le domaine de la construction nécessite l'interdisciplinarité afin de proposer aujourd'hui des solutions ne compromettant pas la capacité des générations futures de répondre aux leurs.

Les perspectives sont nombreuses, que cela soit en recherche académique ou en recherche opérationnelle. En effet, bien que le réemploi des matériaux ou les cultures constructives locales sont aujourd'hui connus des architectes, ils ne sont que rarement utilisés dans les projets de construction et parfois cantonnés à une dimension de *manifeste*. La recherche en Génie Civil est nécessaire afin de donner les outils nécessaires à leur utilisation à une plus grande échelle. Actuellement, l'interdisciplinarité entre SHS et STI est clairement favorisée par les institutions académiques. Cette tendance ne pourra plus s'inverser car elle permet d'améliorer la pertinence et la connaissance des disciplines.

Conclusions et perspectives

3.6 Bilan

Ce mémoire retrace les principaux travaux que j'ai mené de 2005 à 2016. Il est décomposé en trois parties distinctes ayant toutefois des interactions.

La première partie concerne la modélisation des géomatériaux et du phénomène de la localisation des déformations. Pour cette étude, la cinématique du milieu est enrichie grâce à un modèle local de second gradient afin d'assurer l'objectivité des résultats par rapport aux maillages utilisés. Cependant, un tel modèle ne permet pas de restaurer l'unicité des solutions et ceci a été largement développé et démontré dans le chapitre 1 de ce mémoire. Si le premier point, concernant la nécessité d'utiliser des modèles assurant l'objectivité par rapport au maillage, est aujourd'hui largement connu par les chercheurs du monde entier ayant à modéliser des matériaux présentant un adoucissement dans la zone post-localisation, le second point, concernant la non-unicité, est habituellement éludé ou mal connu. L'objectif du travail présenté dans ce chapitre était alors d'apporter des preuves tangibles de cette non unicité et d'évaluer son impact. Pour ce faire, un large panel de tests numériques ont été menés sur des modèles de complexités croissantes (mécanique pure, hydromécanique, triphasique). Ainsi, le problème de non-unicité, traité habituellement de façon théorique, a été mené ici de façon concrète et illustré par des patronnes de localisations. Ce travail peut sembler avoir deux limitations fortes. D'une part, il a nécessité un grand nombre de calculs afin d'exhiber différentes solutions, ce qui est toujours assez fastidieux. Cependant la rapidité des moyens de calculs actuels n'est pas réellement limitant. D'autre part, il ne permet pas de prédire la solution la plus juste par rapport à un problème réel mais cela est parfaitement en résonance avec la nature puisque la solution qui sera mise en exergue lors d'un essai mécanique expérimental en laboratoire, n'est pas non plus déterminée à l'avance. Si cette dernière est probablement unique pour un échantillon donné, elle peut être totalement différente d'un échantillon à un autre du fait de la diversité de la microstructure. Alors que faire ? En attendant d'avoir accès à la microstructure de façon systématique (par exemple par tomographie à rayon X) afin d'enrichir le dialogue modélisation/expérimentation, il est important de rester humble et d'accepter que l'incertitude fasse partie de notre métier. Connaître et évaluer l'incertitude est déjà une avancée scientifique conséquente. Finalement, le plus grand écueil de la recherche ne serait-il pas de n'avoir que des certitudes ?

La deuxième partie concerne le dialogue expérimental/numérique mené sur une analyse multi-échelles d'une structure. A partir de caractérisations expérimentales d'éléments de connexion (échelle 1) et d'éléments représentatifs d'un système constructif (échelle 2), un macro-élément est calibré afin de pouvoir simuler par prédiction le comportement d'un mur (échelle 3) et d'une maison complète (échelle 4). La force de cette approche multi-échelles est de permettre de réaliser des calculs prenant en compte le comportement non-linéaire hystérétique à l'échelle d'une structure et sous une sollicitation dynamique de séisme à partir d'un code aux éléments

finis tournant sur un logiciel comme matlab®. Certes il reste encore à faire le transfert de cette recherche provenant des pays du Nord vers les pays du Sud afin de permettre aux populations concernées par ce type de construction, qui ouvrent des perspectives d'avenir pour leur résilience, d'avoir un outil de dimensionnement. En attendant, cette recherche est particulièrement innovante puisque qu'elle a permis d'associer des chercheurs provenant de la communauté des ingénieurs et des architectes afin d'analyser des structures vernaculaires, qui par essence sont réalisées sans eux. Ici s'ouvre le champs de recherche sur la rétro-ingénierie. La recherche effectuée a aussi permis d'utiliser des outils et des techniques à la pointe de la recherche scientifique des structures, habituellement utilisés pour des constructions *modernes* au vue des coûts d'utilisation, pour caractériser la vulnérabilité de construction traditionnelle : une table vibrante et de la corrélation d'image. Rappelons ici que c'est une première mondiale. Enfin les essais expérimentaux, en particulier ceux réalisés sur la table vibrante du FCBA, ont pu prouver de façon didactique la qualité parasismique de ces constructions. En effet, la visualisation des vidéos des essais permet une accessibilité au non spécialiste des résultats de notre recherche. Le coût de ce type d'essai doit être alors relativisé en fonction de la facilité du transfert vers les populations concernées. A l'avenir, ceci devrait permettre de généraliser la pratique.

La dernière partie concerne la nécessité de l'interdisciplinarité pour apporter des réponses efficaces aux défis de demain. Il tend à mettre l'Homme au centre du processus de la construction. L'Homme est fragilisé par le dérèglement climatique et la pénurie annoncée en matière première. Mais n'oublions pas que c'est l'Homme qui est responsable de cela et que le développement économique et technologique est aussi à l'origine de l'augmentation des risques (naturels, industriels et financiers). Le domaine de la construction est particulièrement polluant et monopolise énormément de ressources premières. La recherche en Génie Civil ne peut plus être déconnectée de son impact sociétal qui doit être analysé de façon globale. Elle doit s'adapter à ces nouvelles contraintes. Pour cela, elle a besoin de collaborer avec les SHS, ce qui a été démontré dans le chapitre 3. En particulier, la collaboration mise en place ces dernières années entre le laboratoire 3SR et le laboratoire CRATerre a été présentée. Les pays en voie de développement subissent de plein fouet l'augmentation des catastrophes naturelles. Ils sont de plus en plus vulnérables à ces aléas du fait de l'augmentation de la croissance démographique, d'une urbanisation incontrôlée, d'un exode rural et de l'évolution rapide des méthodes de construction. Ceci est dû d'une part, à l'aspiration de la population à bénéficier d'un habitat considéré comme *moderne* et symbolique des pays développés et d'autre part, aux effets de la (re)construction par les bailleurs sociaux internationaux apportant une réponse unique non située. A contrario, notre démarche consiste de partir du site pour ensuite définir un programme de construction. Ceci nécessite une phase initiale d'évaluation des cultures constructives locales, des besoins et des usages en terme d'habitat, de l'organisation sociétale, des capacités économiques et des ressources locales en terme de matériaux et compétences. Cette nécessaire synthèse permet de proposer des solutions efficaces de construction, capable de développer une résilience sociétale par la réappropriation des techniques provenant de leur propre culture constructive et le développement d'une filière économique autonome. La situation post catastrophe naturelle s'accompagne de 3 phases distinctes dans le temps. La première est assez courte, elle correspond à l'aide d'urgence, immédiatement nécessaire après la situation de crise afin de survenir à l'urgence sanitaire et au relogement provisoire de la population. La deuxième est plus longue. Elle correspond au re-développement des sociétés, du bâti et des infrastructures. Ces deux premières phases sont prises en charge par l'aide humanitaire internationale. La troisième phase commence lorsque l'aide humanitaire s'arrête ou se stabilise au niveau d'avant la crise. C'est à ce moment là que les populations doivent

pouvoir poursuivre leur développement de façon autonome. Il faut donc que les modèles de reconstruction soient adaptés à cette troisième phase et qu'ils puissent évoluer dans le temps de façon dynamique afin d'assimiler les nouveaux savoir-faire et les nouveaux besoins. Comme nous l'avons aussi vu dans ce chapitre, pour que la population puisse redevenir autonome, il faut que les ingénieurs et les architectes soient formés.

Un parallèle peut aisément être réalisé sur ce travail au niveau des pays développés, ce qui permet aussi de réinterroger l'équilibre entre les pays du Nord et du Sud. En effet, les pays développés sont dans une situation identique : les cultures constructives locales ont été délaissées depuis plusieurs décennies et la connaissance même concernant à la fois la manière de les réaliser et pourquoi elles étaient réalisées ainsi ont été perdues. Or, les questions liées à la soutenabilité de façon générale font que ces modèles de construction sont particulièrement pertinents pour permettre de retourner à des constructions plus respectueuses de l'environnement, plus frugales et faisant appel à des matériaux locaux et naturels. Il est dès lors évident que la promotion des cultures constructives doit avoir lieu à l'échelle mondiale, sans restriction. Bien sûr, cela ne signifie pas pour autant que la construction *moderne* doit être abandonnée ou stigmatisée. Mais comme nous l'avons vu dans la première partie de ce mémoire sur un sujet assez éloigné, il est important de ne pas perdre de vue que l'unité des solutions n'existe pas. La pertinence des solutions doit être évaluée au cas par cas.

3.7 Perspectives de recherche

Je prévois de centrer mes travaux futurs sur la caractérisation de la vulnérabilité des cultures constructives locales en lien avec mes partenaires du laboratoire CRAterre. Je bénéficie actuellement d'une réelle opportunité pour mener à bien ce type de recherche car le laboratoire 3SR vient de s'équiper d'une dalle d'essai DESSIS (Durabilité Et Sûreté des Structures en Interaction avec le Sol) permettant des essais à l'échelle de la structure. Cette plate-forme expérimentale manquait cruellement sur le site Grenoblois et ouvre des perspectives variées de recherche aux expérimentateurs travaillant à l'échelle de la structure. Cette dalle d'essai de 7 m x 8 m comporte 56 points d'ancrages précontraints pouvant supporter une charge horizontale de 250 kN et verticale de 500 kN par point d'ancrage. Elle est actuellement équipée d'un mur de réaction de 2,4 m de haut et capable de reprendre une charge horizontale de 1000 kN (Fig. 3.15).



FIGURE 3.15 – Dalle d'essai structures DESSIS et le mur de réaction

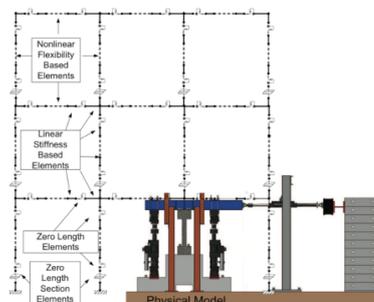


FIGURE 3.16 – Sous-structuration d'un essai pseudo-dynamique

A cours terme, je participe au développement de trois moyens expérimentaux qui permettront d'avoir sur DESSIS les 3 familles d'essai usuellement utilisées pour caractériser la vulnérabilité des structures dans le génie parasismique :

- un banc d'essai de type mur de réaction pour effectuer des essais quasi-statique monotone et cyclique à l'échelle d'un mur. Dans ce type d'essais, la raideur, la résistance et la perte d'énergie hystérétique inhérente au comportement non linéaire des structures sont caractérisés. Cependant, ils ne tiennent pas en compte des effets liés à la vitesse du chargement sur la structure.
- un table-vibrante de 2,5 x 3,5 m (cf. chapitre 2). Ces essais permettent de caractériser la raideur, la résistance, les phénomènes de dissipations cycliques mais aussi les effets visqueux et d'inerties des structures. Habituellement, ce type d'essai est relativement rare car il est coûteux. Le fait d'avoir une table vibrante de petite dimension et le choix de l'utiliser sur des portions de structures (i.e. des murs) provenant des cultures constructives doit pouvoir nous prémunir de cette difficulté.
- un banc d'essai de type mur de réaction pour effectuer des essais pseudo-dynamique à l'échelle d'un portique. Ce type d'essai est une alternative intéressante aux essais sur table vibrante. Ils permettront de caractériser de manière dynamique une structure ou d'un élément de structure en simulant les effets d'inerties de toute ou partie de l'ouvrage sur la partie de structure testée dont le comportement mécanique reste à explorer. Ce type d'essais largement développé ces 20 dernières années permet de caractériser le comportement des structures en terme de raideur, résistance, comportement cyclique. Ils permettront de se concentrer uniquement sur la zone méconnue de la structure en modélisant les effets d'inerties apportés par le reste de la structure modélisée. L'interprétation des résultats et le pilotage des essais seront particulièrement aisés dans la mesure où l'essai, étant statique, pourra être arrêté à tout moment.

Certes, d'autres Universités ont déjà la capacité d'avoir sur le même site ces 3 moyens d'expérimentation (en particulier l'Université de Sherbrooke au Canada) mais d'une part, cela n'existe pas en France et d'autre part, ils sont toujours utilisés pour des structures plus lourdes, en béton armé, ce qui complexifie grandement leur utilisation.

A très court terme, ces trois moyens expérimentaux seront développés de façon commune afin d'améliorer la connaissance sur la vulnérabilité des structures et développer une expertise Grenobloise forte sur l'expérimentation en génie parasismique des structures. De plus, je souhaite mettre en place une comparaison des trois moyens expérimentaux afin de déterminer finement l'apport et la limitation de chacun. De façon tout à fait concrète, je souhaite apporter des réponses concernant l'apport d'une inclusion en bois dans un mur maçonné. Des études préliminaires ont déjà été réalisées et présentées dans le chapitre 2. L'objectif maintenant est de passer à l'échelle du mur pour caractériser leur apport. Je prévois donc de caractériser le comportement hystérétique de cette typologie constructive en comparant les diagrammes Force-Drift d'un mur avec ou sans inclusion en bois sur des essais quasi-statiques. Puis, le comportement dynamique sera aussi mis en lumière avec un essai sur un mur de même dimension et sollicité par un signal sismique transmis par la table vibrante. Enfin, ces résultats devront nous permettre de calibrer et de valider la méthode pseudo-dynamique. Une fois cet outil "maîtrisé", nous pourrons alors utiliser les principes de sous-structurations (Fig. 3.16) afin d'étudier une structure entière ou multi-étagée.

De façon plus lointaine, je souhaite m'investir sur la prise en compte de la variabilité des résultats en fonction de la qualité de réalisation. Ceci est particulièrement important dans un contexte de recherche opérationnelle de reconstruction. En effet, les essais de laboratoire

comme les modélisations numériques sont habituellement “trop” parfaites au niveau de leur réalisation et ne correspondent pas exactement aux constructions réalisées, ce qui peut être un biais au niveau des conclusions apportées. A titre d'exemple, la mise en place de renforcements verticaux en bois dans les constructions maçonnées (en particulier dans les coins) fait débat entre les spécialistes, théoriciens du génie parasismique qui préconisent ce renforcement pour éviter la destruction des coins lors d'un séisme et les opérateurs de la construction qui, prenant en compte la difficulté de réalisation, estiment que cela conduit à un affaiblissement de la jonction de la maçonnerie. L'organisation de la maçonnerie de pierre est prépondérant par rapport à sa capacité de résistance au cisaillement ([Vasconcelos et Lourenço \[2009\]](#)). Dès lors, un renfort vertical perturbe obligatoirement le calepinage des pierres. [Dowling et al. \[2005\]](#) ont montré que la présence de renforts verticaux en bambou dans un mur d'adobe avait conduit à l'apparition de fissures alors que sans renfort vertical aucun dommage apparent n'était visible. Cependant un guide pour la reconstruction au Népal édité par l'AFPS ([Winter \[2016\]](#)) préconise la mise en place de ces renforts verticaux. Mon intention sera d'apporter des nouvelles preuves scientifiques sur cette question en testant des réalisations plus ou moins soignées (Fig. 3.17).

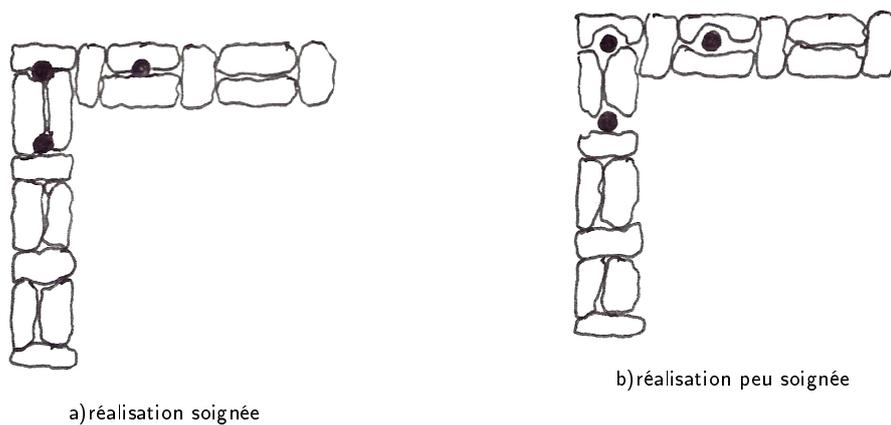


FIGURE 3.17 – Renforcements verticaux

Bibliographie

- ALI, Q., SCHACHER, T., ASHRAF, M., ALAM, B., NAEEM, A., AHMAD, N. et UMAR, M. (2012). In-plane behavior of full scale dhajji walls (wooden braced with stone infill) under quasi static loading. *Earthquake Spectra*, 28(3):835–858.
- ANNETTE, J. (2010). The challenge of developing civic engagement in higher education in england. *British Journal of Educational Studies*, 58(8):451–463.
- AUDEFRO, J. F. (2011). Haiti : post-earthquake lessons learned from traditional construction. *Environment and Urbanization*, 23(2):447–462.
- BERNIER, F., LI, X. et BASTIAENS, W. (2007). Twenty-five years' geotechnical observation and testing in the tertiary boom clay formation. *Geotechnique*, 57(2):229–237.
- BÉSUELLE, P., CHAMBON, R. et COLLIN, F. (2006). Switching deformation modes in post-localization solutions with a quasibrittle material. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 1:1115–1134.
- BOURG, D. et WHITESIDE, K. (2009). Pour une démocratie écologique. *La Vie des idées*, , 1er septembre 2009. ISSN : 2105-3030. URL : <http://www.laviedesidees.fr/Pour-une-democratie-ecologique.html>.
- CAIMI, A., VIEUX-CHAMPAGNE, F., GARNIER, P., GUILLAUD, H., MOLES, O., DAUDEVILLE, L., SIEFFERT, Y. et GRANGE, S. (2014). Savoirs traditionnels et connaissances scientifiques pour une réduction de la vulnérabilité de l'habitat rural face aux aléas naturels en haïti. *Field Actions Science Reports FACTS*, 9:1–8.
- CDC (2014). Climat recherche. *Chiffres clés du climat France et Monde Édition 2014*, http://www.if-carbone.com/transfert/chiffres_cles_du_climat_CDC_2014.pdf.
- CECCOTTI, A., FACCIO, P., NART, M. et SIMEONE, P. (2006). Seismic behavior of historic timber-frame buildings in the italian dolomites. In *15th International Symposium ICOMOS*, page 16.
- CHAMBON, R. et MOULLET, J. (2004). Uniqueness studies in boundary value problem involving some second gradient models. *Computer Methods Appl. Mech. Eng.*, 193:2771–2796.
- CHARLESON, A. et PIRIE, S. (2009). An investigation of structural engineer-architect collaboration. *J. Struc. Eng. Soc. N. Z.*, 22(1):97–104.
- CHARLIER, R. (1987). Approche unifiée de quelques problèmes non linéaires de mécanique des milieux continus par la méthode des éléments finis. Ph.D. thesis, University of Liège, Belgium.

- COMBE, G. et RICHEFEU, V. (2013). Tracker : a particule image tracking (pit) technique dedicated to nonsmooth motions involved in granular packings. *In Powders and Grains 2013 : Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, volume 1542(1), pages 461–464. AIP Conf. Proc.
- DAUDON, D., SIEFFERT, Y., ALBARRACIN, O., LIBARDU, L.-G. et NAVARTA, G. (2014). Adobe construction modeling by discrete element method : first methodological steps. *Procedia Economics and Finance*, 18:247–254.
- DE BORST, R. et MÜHLAUS, H. (1992). Gradient-dependent plasticity : formulation and algorithmic aspect. *Int. J. Num. Methods Eng.*, 35:521–539.
- DELESTRAC, D. (2013). Le sable, enquête sur une disparition. *un documentaire de Denis Delestrac (France/Canada, 2013, 1h14mn)*, Coproduction : ARTE France.
- DESRUES, J. et VIGGIANI, C. (2004). Strain localization in sand : an overview of the experimental results obtained in grenoble using stereophotogrammetry. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 28:279–321.
- DOĞANGÜN, A., TULUK, O.-I., LIVAOĞLU, R. et ACAR, R. (2006). Traditional wooden buildings and their damages during earthquakes in turkey. *Engineering failure analysis*, 13:981–996.
- DOWLING, D., SAMALI, B. et LI, J. (2005). An improved means of reinforcing adobe walls - external vertical reinforcement. *In SismoAdobe, Lima, Peru*, page 19.
- EWY, R. et COOK, N. (1990). Deformation and fracture around cylindrical openings in rock-ii. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, 27:409–427.
- FRANÇOIS, B., LALOU, L. et LAURENT, C. (2009). Thermo-hydro-mechanical simulation of atlas in situ large scale test in boom clay. *Computers and Geotechnics*, 36:626–640.
- FREEAR, A., BARTHEL, E., OPPENHEIMER DEAN, A. et HURSLEY, T. (2014). *Rural Studio at tewenty, designing and building in Hale county, Alabama*. first ed. Princeton Architectural Press.
- GERMAIN, P. (1973). The method of virtual power in continuum mechanics. part 2 micro-structure. *SIAM J. Appl. Math.*, 25:556–575.
- GODDARD, J. et VALLANCE, P. (2013). *The university and the city*. Routledgen, Taylor & Francis group.
- GOODALL, C. (2011). Peak stuff - did the uk reach a maximum use of material resources in the early part of the last decade? *Carbon Commentary 2011*, http://www.carboncommentary.com/wp-content/uploads/2011/10/Peak_Stuff_17.10.11.pdf (accessed 15 October 2014).
- GÜLHAN, D. et GÜNEY, I.-O. (2000). The behavior of traditional building systems against earthquake and its comparison to reinforced concrete frame systems : experiences of marmara earthquake damage assessment studies in kocaeli and sakarya. *Proceedings of Earthquake-safe : Lessons to be Learned from Traditional Construction*, Istanbul, Turkey, Nov. 16-18, available at : <http://www.icomos.org/iawc/seismic/Gulhan.pdf>.

- HASELBACH, L. (2011). Special issue on sustainability in civil and environmental engineering education. *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, 137(2):49–50.
- HASSANIZADEH, M. et GRAY, W. (1979a). General conservation equations for multi-phase systems : 1. average procedure. *Advances in Water Resources*, 2:131–144.
- HASSANIZADEH, M. et GRAY, W. (1979b). General conservation equations for multi-phase systems : 2. mass, momenta, energy, and entropy equations. *Advances in Water Resources*, 2:191–208.
- HILL, R. (1978). Aspects of invariance in solid mechanics. *Advances in applied mechanics*, 18:1–75.
- HUA, T., XIE, H., WANG, S., ZHENXING, H., CHEN, P. et ZHANG, Q. (2011). Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation. *Optics and Lasers in Engineering*, 43:9–13.
- HUMBERT, J., BOUDAUD, C., BAROTH, J., HAMEURY, S. et DAUDEVILLE, L. (2014). Joints and wood shear walls modelling i : Constitutive law, experimental tests and fe model development under quasi-static loading. *Engineering Structures*, 65:52–61.
- HYNDMAN, D. et HYNDMAN, D. (2015). *Natural hazards and disasters*. Cengage Learning.
- HYOUNG-SUK, C., JIN-HWAN, C., SANG-HYO, K. et JIN-HEE, A. (2011). Structural dynamic displacement vision system using digital image processing. *NDT&E International*, 44:597–608.
- JELLE, B.-P., BREIVIK, C. et RØKENES, H.-D. (2012). Building integrated photovoltaic products : a state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Mater*, 100:69–96.
- JIGYASU, R. (2008). Structural adaptation in south asia. learning lessons from tradition. *In Hazards and built environment. Attaining built-in*, pages 74–95. Lee Boshier, Routledge, London and New York.
- LABIOUSE, V., SAUTHIER, C. et YOU, S. (2014). Hollow cylinder simulation experiments of galleries in boom clay formation. *Rock Mech. Rock Eng.*, 47(1):43–55.
- LANGENBACH, R. (2008). Learning from the past to protect the future : Armature crosswalls. *Engineering Structures*, 30:2096–2100.
- LOZANO GARCÍA, F., KEVANY, K. et HUISINGH, D. (2006). Sustainability in higher education : what is happening? *Journal of Cleaner Production*, 14(9-11):757–760.
- LU, L. et YANG, H.-X. (2010). Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (bipv) system in hong kong. *Appl. Energy*, 87:3625–3631.
- MARINELLI, F., SIEFFERT, Y. et CHAMBON, R. (2015). Hydromechanical modeling of an initial boundary value problem : Studies of non-uniqueness with a second gradient continuum. *International Journal of Solids and Structures*, 54:238–257.
- MATSUSHIMA, T., CHAMBON, R. et CAILLERIE, D. (2002). Large strain finite element analysis of a local second gradient model : application to localization. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 54:499–521.

- MCDONALD, N. et PEARCE, J. (2010). Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. *Energy Policy*, 38(11):7041–7047.
- MEIRELES, H., BENTO, R. et CATTARI, S. Lagomarsino, S. (2012). A hysteretic model for frontal walls in pombalino buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(5):1481–1502.
- MINDLIN, R. (1964). Micro-structure in linear elasticity. *Arch. Ration. Mech. An.*, 16:51–78.
- MOKNI, M. et DESRUES, J. (1999). Strain localization measurements in undrained plane-strain biaxial tests on houston rf sand. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 4(4):419–441.
- MÜHLAUS, H. et AIFANTIS, E. (1991). A variational principle for gradient plasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 28(7):845–857.
- OPPENHEIMER DEAN, A. et HURSLEY, T. (2002). *Rural Studio, Samuel Mockbee and an Architecture of Decency*. first ed. Princeton Architectural Press.
- OPPENHEIMER DEAN, A. et HURSLEY, T. (2005). *Proceed and Be Bold : Rural Studio after Samuel Mockbee*. first ed. Princeton Architectural Press.
- PAULTRE, P., CALAIS, E., PROULX, J., PRÉPETIT, C. et AMBROISE, S. (2013). Damage to engineered structures during the 12 january 2010, haiti (léogâne earthquake). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(8):777–790.
- PAWLEY, M. (1982). *Building for Tomorrow*. Sierra Club Books, San Francisco.
- RIBEIRO, D., CALÃŞADA, R., FERREIRA, J. et MARTINS, T. (2014). Non-contact measurement of dynamic displacement of railways bridges using an advanced video-based system. *Engineering Structures*, 75:164–180.
- RICHARD, N., DAUDEVILLE, L., PRION, H. et LAM, F. (2002). Timber shear walls with large openings : experiment and prediction of the structural behaviour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29:713–724.
- RICHEFEU, V., COMBE, G. et VIGGIANI, G. (2012). An experimental assessment of displacement fluctuations in a 2d granular material subjected to shear. *GÃ©otechnique Letters*, 2:113–118.
- SHIH, M.-H. et SUNG, W.-P. (2013). Developing dynamic digital image techniques with continuous parameters to detect structural damage. *Hindawi Publishing Corporation*, 2013: 1–7.
- SIEFFERT, Y. (2014). *le béton armé selon l’Eurocode 2*. Sciences Sup. Dunod.
- SIEFFERT, Y., AL HOLO, S. et CHAMBON, R. (2009). Loss of uniqueness of numerical solutions of the borehole problem modelled with enhanced media. *Int. J. Solids Structures*, 46:63173–63197.
- SIEFFERT, Y., BUZZI, O. et COLLIN, F. (2014a). Numerical study of shear band instability and effect of cavitation on the response of a specimen under undrained biaxial loading. *International Journal of Solids and Structures*, 51(9):1686–1696.

- SIEFFERT, Y., HUYGEN, J.-M. et DAUDON, D. (2014b). Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering/architecture collaboration. *Journal of Cleaner Production*, 67:125–138.
- SIEFFERT, Y., VIEUX-CHAMPAGNE, F., GRANGE, S., GARNIER, P., DUCCINI, J. et DAUDEVILLE, L. (2016). Full-field measurement with a digital image correlation analysis of a shake table test on a timber-framed structure filled with stones and earth. *Engineering Structures*, 123:451–472.
- THORMARK, C. (2006). The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Building and Environment*, 41(8):1019–1026.
- van de LINDT, J., PEI, S., PRYOR, S. E., SHIMIZU, H. et ISODA, H. (2010). Experimental seismic response of a full-scale six-story light-frame wood building. *Journal of Structural Engineering*, 136(10):1262–1272.
- Van den HEOK, P. (2001). Prediction of different types of cavity failure using bifurcation theory. *American Rock Mechanics Association*, pages 45–52.
- VARDOULAKIS, A. et AIFANTIS, E. (1991). A gradient flow theory of plasticity for granular materials. *Acta Mechanica*, 87:197–217.
- VASCONCELOS, G. et LOURENÇO, P. B. (2009). In-plane experimental behavior of stone masonry walls under cyclic loading. *Journal of Structural Engineering*, 135(10):1269–1277.
- VIEUX-CHAMPAGNE, F., SIEFFERT, Y., GRANGE, S., BELINGA NKO'O, C., DUCCINI, J.-C., FAYE, C. et DAUDEVILLE, L. (2016). Experimental analysis of a shake table test of a timber-framed structures with stones and earth. *Earthquake Spectra, under review with minor modification*.
- VIEUX-CHAMPAGNE, F., SIEFFERT, Y., GRANGE, S., POLASTRI, A., CECCOTTI, A. et DAUDEVILLE, L. (2014). Experimental analysis of seismic resistance of timber-framed structures with stones and earth infill. *Engineering Structures*, 69:102–115.
- WAAS, T., VERBRUGGEN, A. et WRIGHT, T. (2010). University research for sustainable development : definition and characteristics explored. *Journal of Cleaner Production*, 18(7): 629–636.
- WINTER, T. (2016). Manual for post-earthquake rebuilding in nepalese valleys. *AFPS*, page 47.