POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Développement et application d'un outil interactif pour l'étalonnage des spectres sismiques

ILHAM AKHDIM
Département des Génie Civil, Géologique et des Mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
GÉNIE CIVIL

Novembre 2019

© Ilham Akhdim, 2019.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Développement et application d'un outil interactif pour l'étalonnage des spectres sismiques

présenté par **Ilham AKHDIM**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Koboevic SANDA, présidente
Bouaanani NAJIB, membre et directeur de recherche
Daneshvar POULAD, membre externe

DÉDICACE

Pour ma famille
et mes amis...

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études et à son bon déroulement. Je voudrais adresser mes remerciements au corps professoral et administratif de l'université de Polytechnique Montréal qui a contribué à la réussite de mes études universitaires.

Je remercie Mr. Najib Bouaanani, mon encadrant et directeur de mémoire, pour son énorme support, sa disponibilité et ses conseils qui ont contribué à la qualité de ce projet. Son encouragement et son dynamisme m'ont énormément aidé. Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance. Je tiens à remercier Mme Koboevic Sanada et Mr. Daneshvar Poulad d'avoir accepté d'être membre du Jury.

Je remercie de tout cœur mes chers parents Fatiha Eddayani et Ahmed Akhdim, pour leur sacrifice, leur patience et leur amour inconditionnel. D'ailleurs de tiens à leur dédier ce travail. Je remercie mes sœurs Sara et Soukaina et mon frère Reda, pour leurs encouragements.

RÉSUMÉ

Grâce au progrès accompli dans le génie parasismique, les analyses dynamiques temporelles linéaires et non linéaires deviennent de plus en plus communes lors de la conception ou l'évaluation des structures de génie civil. La sélection et l'étalonnage d'un nombre de secousses sismiques appropriées constitue l'une des étapes essentielles des analyses sismiques. Elles peuvent avoir des effets considérables en représentant une grande source d'incertitude et de variabilité dans les estimations de la réponse.

Le processus d'étalonnage d'un ensemble de séismes peut être ambigu et/ou fastidieux. Bien qu'on dispose de plusieurs méthodes systématiques et utiles à cet effet, les critères sousjacents font souvent l'objet de discussions et de débats. Pour aider l'ingénieur à évaluer les effets de ces différentes méthodes, de nombreuses recherches sont disponibles dans la littérature. Néanmoins, et particulièrement au Canada, il existe un grand manque d'outils interactifs permettant de faciliter cette tâche.

Cette problématique a inspiré le développement d'un outil informatique interactif, robuste et convivial, pour l'étalonnage des séismes. Les fonctionnalités conçues dans l'outil, sont optimisées de façon à guider l'utilisateur à travers le processus d'étalonnage. Au total, six méthodes d'étalonnage sont intégrées, incluant celles préconisées par le CNB2015, et l'ASCE/SEI 7-10. Avec cet outil, l'utilisateur a la possibilité d'importer un ensemble d'accélérogrammes historiques ou simulés en fonction des besoins de l'analyse.

L'outil d'étalonnage est programmé sous le language MATLAB. L'utilisateur introduit des informations d'entrée par le biais dune interface graphique conviviale. Ces informations comprennent notamment les plages des périodes de vibration de la structure étudiée, le type d'analyse, i.e. unidirectionnelle ou bidirectionnelle, les accélérogrammes, le spectre cible de conception, le nombre souhaité des séismes étalonnés à retenir. En utilisant ces informations, l'outil proposé génère automatiquement les spectres de réponse sismique originaux, i.e. avant étalonnage, et étalonnés, ainsi qu'un résumé des paramètres d'étalonnage utilisés. Les spectres de réponse d'origine et étalonnés sont également représentés graphiquement pour permettre à l'utilisateur de visualiser l'effet de l'étalonnage et d'effectuer des itérations le cas échéant.

L'outil développé peut être utile à des fins de conception ou d'évaluation des structures face aux séismes. À cet effet, des exemples illustrant l'utilisation et les fonctionnalités de l'outil sont également présentés dans ce mémoire.

ABSTRACT

With advances in computer technology and earthquake engineering, it has become more common for structural engineers to predict the response of a structure subjected to ground motions using linear and nonlinear time history analyses. Selection and scaling of seismic motions are one of the most important steps of such analyses.

Due to the lack of consensus in the earthquake engineering community on how to appropriately select and scale ground motions, plenty of research was exclusively dedicated to this issue, mainly to deliver guidance to design professionals. However, scaling earthquake ground motions is a tedious task that may require significant effort from the analyst. In the canadian earthquake engineering community, there is a lack of automated tools available for this task.

This issue motivated the development of a new robust interactive scaling toolbox, that facilitates the scaling of ground motions to a target spectrum.

The design of the this tool mainly focused on integrating functionalities that are intuitive and easy to use. The interactive features provide utilities for data import and output visualization. The tool is also built to be compliant with 6 scaling methods including those of NBCC-2015 and ASCE/SEI 7-10. To make it easier for the user, the integrated scaling methods can be freely adjusted. Moreover, the features of the tool do not constrain the user to a built-in database. This earthquake database can indeed be customized by the user and may contain an unlimited number of ground motions.

The ground motion scaling toolbox is developed using MATLAB App Designer. Through its user interface, the program receives user input information about the structure and the to be scaled ground motions. These include, the type of analysis, i.e., unidimensional or bidimensional, the period range of interest, the target spectrum, the desired number of scaled time histories and the data format. Using this information, the toolbox automatically generates, original and scaled response spectra, printed scaled times histories in a format compatible with most structural analysis programs and a tabular summary of the applied scale factors and the selection refinement parameters. The original and scaled response spectra are also plotted in different graphs, as an additional feature which migth help the user to judge the accuracy of the scaling.

The ground motion scaling toolbox can be useful for research or design purposes and will be made public for professors, students and practicing engineers.

This Master's thesis will have an in-depth focus on how the ground motion scaling toolbox

was developed, its features and its utilities.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vi

TABLE DES MATIÈRES viii

LISTE DES TABLEAUX xi

LISTE DES FIGURES xii

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xviii

LISTE DES ANNEXES xix

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1
- 1.1 Généralités et problématiques 1
- 1.2 Objectifs 3
- 1.3 Méthodologie 3
- 1.4 Présentation du mémoire 4

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 6
- 2.1 Introduction 6
- 2.2 Activité sismique au Canada 6
  - 2.2.1 Contexte des tremblements de terre dans l'Est Canadien 8
  - 2.2.2 Contexte des tremblements de terre dans l'Ouest Canadien 11
  - 2.2.3 Types d'évènements sismiques dans la région du Cascadia 13
  - 2.2.4 Différences et similarités entre l'Est et l'Ouest Canadien 14
- 2.3 Séismes étudiés 14
  - 2.3.1 Sismicité historique 15
  - 2.3.2 Sismicité simulée 16
- 2.4 Sélection et étalonnage des secousses sismiques 16
- 2.5 Méthodes de sélection des secousses sismiques 17

2.6 Méthodes d'étalonnage des secousses sismiques 20
2.6.1 Méthode du CNB2015 20
2.6.2 Méthode du ASCE/SEI 7-10 24
2.6.3 Méthode MSE 25
2.6.4 Méthode PGA 25
2.6.5 Méthode $S(T_1)$ 26
2.6.6 Méthode T_2-1.2T_1 (Partial Spectral Area) 26
2.6.7 Post-Sélection des secousses sismiques 26
2.7 Orientation critique des secousses sismiques 27
2.7.1 Généralités de décorrélation stochastique des mouvements du sol en 2D et 3D 28
2.7.2 Effet de décorrélation sur les secousses sismiques 29
2.8 Étalonnage sur des composantes sismiques bidirectionnelles 29
2.9 Conclusion 31

CHAPITRE 3 OUTIL INTERACTIF POUR ÉTALONNAGE DES SÉISMES . . . 32
3.1 Introduction 32
3.2 Méthodes de calculs intégrées par défaut dans le programme 32
3.2.1 Méthode du CNB2015 33
3.2.2 Méthode du ASCE/SEI 7-10 35
3.2.3 Méthode MSE 37
3.2.4 Méthode PGA 39
3.2.5 Méthode $S(T_1)$ 39
3.2.6 Méthode T_2-1.2T_1 (Partial Spectral Area) 40
3.3 Caractéristiques et fonctionnalités de l'outil 41
3.3.1 Langage de programmation 41
3.3.2 Algorithme implémenté dans l'outil de calcul 43
3.3.3 Fonctionnalités de l'interface graphique de l'outil de calcul 46
3.3.4 Attributs additionnels de l'outil de calcul 56
3.4 Exemple de calcul 58
3.4.1 Mise en situation 58
3.4.2 Barrage Étudié 59
3.4.3 Paramètres de calcul 60
3.4.4 Résultats 62
3.5 Utilisation de l'outil de calcul 69

3.5.1 Projet 1 : Conception et évaluation des ponts isolés sismiquement au Québec en tenant compte des effets des basses températures. 69
3.5.2 Projet 2 : Réponse sismique bidirectionnelle des piliers de pont au Québec 75
3.6 Conclusions 76

CHAPITRE 4 EFFET D'ÉTALONNAGE DES COMPOSANTES SISMIQUES BIDIRECTIONNELLES 77
4.1 Introduction 77
4.2 Systèmes structuraux 78
4.3 Séisme étudié 79
4.4 Étalonnage des composantes horizontales bidirectionnelles 79
4.4.1 Séismes enregistrés ENR et ENT 80
4.4.2 Séismes décorrélés H1 et H2 80
4.4.3 Résultats 80
4.5 Réponse sismique 82
4.5.1 Demande en déplacement 82
4.5.2 Intensité D'Arias 84
4.6 Sélection des secousses sismiques 85
4.7 Conclusions 88

CHAPITRE 5 CONCLUSION 90
5.1 Synthèse des travauxs 90
5.2 Améliorations futures 90

RÉFÉRENCES 92

ANNEXES 97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Modes de vibration du barrage étudié 60
Tableau 3.2 Caractéristiques de la base des données simulée 61
Tableau 4.1 Périodes de vibrations naturelles des systèmes structuraux construit . 78
Tableau 4.2 Caractéristiques de la base des données historique 86

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Aléa sismique du Canada 7
Figure 2.2 Sismicité autour de la plaque Juan de Fuca 8
Figure 2.3 La zone Nord-Est de l'Ontario (NON) 8
Figure 2.4 L'ouest du Québec (WQU) 9
Figure 2.5 Charlevoix-Kamouraska (CHV) 10
Figure 2.6 Bas Saint-Laurent (BSL) 11
Figure 2.7 Nord des Appalaches (NAP) 11
Figure 2.8 Talus laurentien (LSP) 12
Figure 2.9 Accélérogrammes enregistrés à l'Est et l'Ouest Canadien (peu profonds) 15
Figure 2.10 Station El Centro Array #9, Azimut 180, M6.95, Fault type strike slip, $\bar{V}_s = 30\ m/s$ 18
Figure 2.11 Courbe de désagrégation pour Vancouver, BC at 49.250 N 123.120 W , site de classe C, probabilité de dépassement de 2 % en 50 ans pour $T = 0.05s$ 19
Figure 2.12 Exemple du spectre cibles tiré du CNB2015 et modifié 21
Figure 2.13 Orientation enregistrée par l'accélérographe 29
Figure 3.1 Algorithme Général de l'outil de calcul 43
Figure 3.2 Algorithme détaillé de la phase 1 45
Figure 3.3 Interface graphique principale de l'onglet Eastern Canada 47
Figure 3.4 Menu déroulant des différentes méthodes d'étalonnage intégrées dans l'outil de calcul 47
Figure 3.5 Panneau pour la sélection du type d'étalonnage ; a) cas 1 : Pour l'étalonnage sur des composantes sismiques unidirectionnelles ; b) cas 2 : Pour l'étalonnage sur des composantes sismiques bidirectionnelles . . 48
Figure 3.6 Fenêtres pour définir les périodes de vibrations pour la méthode CNB 2015 ; a) cas 1 : Définition par défaut ; b) cas1 : Définition personnalisée ; c) cas 2 : Définition par défaut ; d) cas 2 : Définition personnalisée 49
Figure 3.7 Fenêtres pour définir les modes de vibrations pour la méthode ASCE/SEI 7 ; a) a) cas 1 : Définition par défaut ; b) cas1 : Définition personnalisée ; c) cas 2 : Définition par défaut ; d) cas 2 : Définition personnalisée . . 50
Figure 3.8 Fenêtres pour définir le vecteur poids et les périodes de vibrations pour la méthode MSE 50
Figure 3.9 Note d'avertissement pour la méthode PGA 50

Figure 3.10 Fenêtre pour définir le mode de vibration pour la méthode $S(T_1)$ . . . 51
Figure 3.11 Fenêtres pour définir les périodes de vibrations pour la méthode T_2-$1.2T_1$; a) cas 1 : Définition par défaut ; b) cas 1 : Définition personnalisée ; c) cas 2 : Définition personnalisée 51
Figure 3.12 Menu de déroulement pour l'option Scale Factor Limit 52
Figure 3.13 Format de la base de données pour le cas 1 53
Figure 3.14 Format de la base de données pour le cas 2 53
Figure 3.15 Interface graphique principale de l'onglet Western Canada 55
Figure 3.16 Fenêtres pour définir les périodes cibles et le nombre d'accélérogrammes requis par scénario ; a) Pour deux scénarios ; b) Pour trois scénarios . 56
Figure 3.17 Fenêtres pour charger les bases de données par scénario ; a) Pour deux scénarios ; b) Pour trois scénarios 57
Figure 3.18 Exemples de message d'erreur ; a) Pour une base de données insuffisante ; b) Pour des périodes de vibrations non-consistantes ; c) Pour un vecteur poids trop large ou trop petit ; d) Pour les entrées non numériques ; e) Pour un spectre cible non définis ; f) Pour des facteurs d'étalonnages non trouvés 58
Figure 3.19 Exemples d'alertes et de confirmations ; a) Progression d'ètalonnage ; b) Progression du calcul des spectres de réponses ; c) Avertissement de calcul d'un deuxième facteur d'étalonnage ; d) Confirmation de chargement de la base de données ; e) Avertissement de la non nécessité d'un deuxième facteur d'étalonnage 59
Figure 3.20 Géométrie du barrage poids 60
Figure 3.21 Format de la base de données à charger 61
Figure 3.22 Exemple de champs d'entrée pour la méthode du CNB 2015 63
Figure 3.23 Exemple de champs d'entrée pour la méthode MSE 64
Figure 3.24 Avertisement d'un calcul de facteur d'étalonnage secondaire 64
Figure 3.25 Résultats affichés de la méthode CNB 2015 65
Figure 3.26 Résultats tracés de la méthode NBCC 2015 ; a) Détail A ; b) Détail B ; c) Détail C ; d) Détail D 66
Figure 3.27 Résultats affichés de la méthode MSE 67
Figure 3.28 Résultats tracés de la méthode MSE ; a) Détail A ; b) Détail B ; c) Détail C 67
Figure 3.29 Format des résultats imprimés 68
Figure 3.30 Schéma illustrant un modèle numérique d'un pont de géométrie de type 1 développé avec le logiciel CSi Bridge, Tirée de Vandal [1] 70

Figure 3.31 Schéma illustrant un modèle numérique d'un pont de géométrie de type 2 développé avec le logiciel CSi Bridge, Tirée de Vandal [1] 70
Figure 3.32 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas I à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 70
Figure 3.33 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas I à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 71
Figure 3.34 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas II à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 71
Figure 3.35 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas II à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 71
Figure 3.36 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas III à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 72
Figure 3.37 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas III à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 72
Figure 3.38 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas IV à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 72
Figure 3.39 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas IV à une température initiale de -30^0C et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 73
Figure 3.40 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas V à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 73
Figure 3.41 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas V à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 73
Figure 3.42 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas VI à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 74

Figure 3.43 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas VI à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1] 74
Figure 3.44 Détail de la pile rectangulaire ; a) Vue de profil b) Vue en coupe . . . 75
Figure 3.45 Moyennes géométriques étalonnées sur le spectre de conception de Montréal pour un sol de type C 76
Figure 4.1 Modèle à 2 DDL soumis à une excitation sismique bidirectionnelle : a) comportement linéaire élastique ; b) comportement bilinéaire plastique 78
Figure 4.2 Composante ENR 79
Figure 4.3 Composante ENT 79
Figure 4.4 composante majeure H1 79
Figure 4.5 composante mineure H2 79
Figure 4.6 Illustration d'application des secousses sismiques horizontales 80
Figure 4.7 Spectres de conceptions proposées pour H1 et H2 par Bouaanani et Bartosh [2] 81
Figure 4.8 Sytème 2 : Variation du déplacements en X pour $\theta = 0^o$ 83
Figure 4.9 Magnitudes et distances épicentrales enregistrés 86
Figure 4.10 Enregistrements sismiques erronés rejetés de la base de données historiques 87
Figure 4.11 Enregistrements sismiques correspondant aux moyennes géométriques 9 et 10 87
Figure A.1 Organigramme détaillé de la méthode du CNB2015 97
Figure A.2 Organigramme détaillé de la méthode du ASCE/SEI 7 98
Figure A.3 Organigramme détaillé de la méthode MSE 99
Figure A.4 Organigramme détaillé de la méthode PGA 100
Figure A.5 Organigramme détaillé de la méthode $S(T_1)$ 101
Figure A.6 Organigramme détaillé de la méthode T_2-1.2T_1 102
Figure B.1 Étude de cas : Spectres de réponses ENR et ENT étalonnés 103
Figure B.2 Étude de cas : Spectres de réponses H1 et H2 étalonnés 104
Figure C.1 Comportement linéaire élastique : Exemples de réponses sous des composantes spectrales enregistrés (ENR.MOY,ENT.MOY) et (ENR.IND,ENT.IND) 105
Figure C.2 Intensités d'Arias des accélérogrammes et des réponses en accélérations 106
Figure C.3 Système structurel 1 T_x= 0.5 s, T_y= 0.5 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° . 107
Figure C.4 Système structurel 2 T_x= 0.1 s, T_y= 0.1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° . 108

Figure C.5 Système structurel 3 T_x= 1 s, T_y= 1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° 109
Figure C.6 Système structurel 4 T_x= 0.5 s, T_y= 0.25 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° . 110
Figure C.7 Système structurel 5 T_x= 0.5 s, T_y= 1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° 111
Figure D.1 Comportement bilinéaire plastique : Exemples de réponses sous des composantes spectrales enregistrés (ENR.MOY,ENT.MOY) et (ENR.IND,ENT.IND) 112
Figure D.2 Intensités d'Arias des accélérogrammes et des réponses en accélérations 113
Figure D.3 Système structurel 1 T_x= 0.5 s, T_y= 0.5 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° . 114
Figure D.4 Système structurel 2 T_x= 0.1 s, T_y= 0.1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° . 115
Figure D.5 Système structurel 3 T_x= 1 s, T_y= 1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° 116
Figure D.6 Système structurel 4 T_x= 0.5 s, T_y= 0.25 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° . 117
Figure D.7 Système structurel 5 T_x= 0.5 s, T_y= 1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150° 118
Figure E.1 Méthodes MSE et PGA : Spectres de réponses ENR et ENT étalonnés 119
Figure F.1 Système structurel 1 T_x= 0.5 s, T_y= 0.5 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 120
Figure F.2 Système structurel 2 T_x= 0.1 s, T_y= 0.1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 120
Figure F.3 Système structurel 3 T_x= 1 s, T_y= 1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 121
Figure F.4 Système structurel 4 T_x= 0.5 s, T_x= 0.25 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 121
Figure F.5 Système structurel 5 T_x= 0.5 s, T_y= 1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 122
Figure G.1 Système structurel 1 T_x= 0.5 s, T_y= 0.5 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 123
Figure G.2 Système structurel 2 T_x= 0.1 s, T_y= 0.1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 123
Figure G.3 Système structurel 3 T_x= 1 s, T_y= 1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 124

Figure G.4 Système structurel 4 T_x= 0.5 s, T_y= 0.25 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 124
Figure G.5 Système structurel 5 T_x= 0.5 s, T_y= 1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement 125
Figure H.1 Ensembles des spectres de réponses sélectionnés avec la méthode CNB2015 126
Figure H.2 Ensembles des spectres de réponses sélectionnés avec la méthode PGA 127

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ASE	Analyse Statique Équivalente
ARM	Analyse de réponse Modale Dynamique
CNB	Code National du Bâtiment
CQC	Complete Quadratic Combination
SRSS	Square Root of Sum Squares
ASCE	American Society of civil enrineers
SEI	Structural Engineering Institue
NBCC	National Building Code of Canada
PEER	Pacific Earthquake Engineering Reaserch Center
NGA	Next Generation Attenuation
UHS	Uniform Hazard Spectrum
CMS	Conditional Mean Spectrum
CS	Conditional Spectrum
MCEr	Targeted Maximum Considered Earthquake
MSE	Mean Square Error
SSE	Sum of Square Errors
PGA	Peak Ground Acceleration
EDP	Engineering Demand Parameter
EPA	Effective Peak Acceleration
EPV	Effective Peak Velocity
AI	Arias Intensity
GMPEs	Groumd Motion Prediction Equations
FEMA	Federal Emergency Management Agency
ke	Rigidité du modèle linéaire élastique
kp	Rigidité du modèle bilinéaire plastique
c	Amortissement visqueux
M	Masse du système structurel
IM	Intensity Measures

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Organigrammees des méthodes de calul implémentés dans l'outil de calcul 97

Annexe B Spectres de réponses des accélérogrammes enregistrés et décorrélés étalonnés par la méthode CNB 2015 103

Annexe C Comportement linéaire élastique : Réponse sous les composantes horizontales 105

Annexe D Comportement Élasto-Plastique : Réponse sous les composantes horizontales 112

Annexe E Spectres de réponses des accélérogrammes enregistrés étalonnés par la méthode MSE et PGA 119

Annexe F Comportement linéaire élastique : Effet d'étalonnage sur la réponse structurelle 120

Annexe G Comportement élasto-plastique : Effet d'étalonnage sur la réponse structurelle 123

Annexe H Ensembles des spectres de réponses sélectionnés avec les méthode CNB 2015 et PGA 126

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Généralités et problématiques

Un tremblement de terre est brusque et soudain, et les victimes qu'il cause en quelques instants peuvent se compter en milliers. L'approche d'ingénierie de base impliquant la résistance d'une structure sous l'effet d'un mouvement du sol est subdivisée en trois catégories :

1. Analyser la réponse sismique de la structure étudiée.
2. Concevoir de façon économique et sécuritaire.
3. Construire et inspecter pour assurer les objectifs de la conception.

En raison de la nature d'un séisme, deux philosophies sont adoptées pour la conception des structures situées dans des régions sujettes à celui-ci. La première philosophie consiste à faire en sorte que, les dégâts d'une structure engendrés par le séisme doivent être le minimum possible. Pour la seconde, si le séisme est majeur avec une probabilité de retour faible, la structure doit résister à l'écroulement malgré les dégâts importants. Bien évidemment, les niveaux de conception dépendent également de l'importance de la structure, de son utilisation et des conséquences de sa défaillance.

Dans la pratique de la conception parasismique, le code national du bâtiment (CNB 2015) permet l'utilisation de plusieurs procédures statiques et dynamiques. Parmi les procédures simplifiées, l'analyse statique équivalente (ASE) et l'analyse dynamique de réponse modale (ARM). Ces analyses sont largement utilisées. Cependant, elles éprouvent certaines limitations. D'une part, pour les structures ou les effets des modes supérieurs sont importants, ASE perd de la précision de façon considérable. D'autre part, ARM fournit une précision améliorée. Néanmoins, elle a recours à des techniques de combinaisons statistiques (CQC, SRSS) qui peuvent induire des résultats inexacts [3].

Pour remédier à ces limitations, l'analyse dynamique temporelle est appliquée. Cette méthode a été très limitée, et n'a été utilisé que pour l'évaluation sismique des structures importantes. Compte tenu des progrès accomplis dans l'ingénierie sismique au cours des dernières décennies, plusieurs plateformes numériques robustes sont maintenant disponibles pour établir des modèles assez puissants afin de faciliter les analyses des difficultés modérées ou importantes. Aujourd'hui, les éditions récentes du code de conceptions modernes permettent aux ingénieurs d'employer les différentes méthodes d'analyses dynamiques linéaires et non linéaires [4].

Le présent mémoire portera sur une étape essentielle de l'analyse dynamique temporelle. Il

s'agit du processus qu'établit l'ingénieur pour fin d'étalonnage d'une excitation sismique. En effet, pour obtenir une réponse sismique réaliste et fiable, les évènements sismiques utilisés par l'ingénieur doivent être représentatifs de certaines exigences liées à l'emplacement géographique de la structure. D'ailleurs, ces exigences vont être abordées en détail plus loin dans la revue de littérature.

Le processus d'étalonnage d'un ensemble de mouvement de sol approprié est ambigu et fastidieux. Une première problématique qu'un ingénieur en exercice pourrait confronter, est la disponibilité limitée des programmes informatiques servant à faciliter cette tâche. Bien que certains outils soient actuellement disponibles à cette fin, particulièrement au Canada, ils sont peu et restent indispensables. Les outils disponibles opèrent différemment avec des interfaces et des bases de données distinctes. Parmi les plus reconnu, il y a "PEER Ground Motion Database". Ce système bien conçu, est facile à utiliser avec un fonctionnement relativement rapide. Il est également disponible en ligne, gratuitement pour tous les utilisateurs. Néanmoins :

— Il ne peut servir que pour l'évaluation du risque sismique provenant des évènements peu profond ("Crustal") à cause sa base de données limitée. Malheureusement, le système devient inutile pour l'évaluation du risque sismique provenant des zones de subductions du Cascadia.
— il est limité à seulement deux méthodes d'étalonnages conventionnelles, soit MSE et $S(T_1)$
— il ne peut être utilisé au Canada, à cause de la non-conformité à la norme locale (CNB 2015).

D'autres outils sont disponibles dans la littérature comme, SeismoMatch, SigmaSpectra et QuakeManager, etc. Malgré leur utilité, comme PEER, ils ont tous des limitations du choix des méthodes d'étalonnage et ne répondent pas tous aux normes canadiennes.

En général, un grand manque s'avère sur la disponibilité des outils qui peuvent s'adapter au maximum aux besoins de l'ingénieur.

Une autre difficulté se prononce sur la complexité des règlements prescrits dans le code. En effet, la réponse d'une structure en génie civil peut être sensiblement dépendante des différentes interprétations aux directives de ce dernier. Certes, plusieurs instituts de recherche étudient l'adéquation des procédures de conception. Néanmoins, les enquêtes sur les différentes interprétations adoptées par un ingénieur sont négligées. Il serait donc primordial d'étudier la cohérence du jugement de l'ingénieur avec le code de conception.

Dans ce mémoire, avec l'aide de l'outil de calcul développé, différents jugements d'ingénieurs

sur les choix des secousses sismiques modifiées, vont être testés pour évaluer la réponse d'une structure sous l'effet d'une excitation sismique bidirectionnelle. Des représentations de celle-ci sont proposées par plusieurs chercheurs. Parmi elles, l'utilisation des composantes principales ou des moyennes géométriques enregistrées. Il serait donc intéressant d'explorer la sensibilité de la réponse structurale aux différentes techniques proposées.

1.2 Objectifs

Les problématiques mentionnées ci-dessus nous incitent à :

1. Mettre au point une nouvelle application de calcul interactif dont le but est de mettre en échelle un ensemble d'accélérogrammes appropriés aux analyses dynamiques temporelles et de faciliter ainsi la tâche à tous les intervenants (Professionnels en ingénierie parasismique, étudiants et chercheurs).
2. Tester les exactitudes de l'outil de calcul sur différentes structures en génie civil.
3. Mettre en œuvre l'outil de calcul : Étudier l'effet des secousses sismiques bidirectionnelles sur la réponse en comparant la définition de la norme canadienne aux définitions proposées dans la littérature et proposer des lignes directrices quant à l'utilisation des secousses sismiques bidirectionnelles.

1.3 Méthodologie

Pour parfaire ce projet, les étapes suivantes sont adoptées :

PHASE A : Développement d'un outil de calcul pour l'étalonnage des secousses sismiques

1. Réaliser une étude préliminaire sur les séismes typiques du continent nord-américain, particulièrement, dans les zones Est et Ouest du Canada.
2. Réaliser une étude approfondie sur des méthodes de sélection et d'étalonnage éditées par différents chercheurs dans ce domaine.
3. Automatiser les méthodes d'étalonnages étudiées comme base pour vérifier la sensibilité des effets d'une approche à une autre.
4. Développer plusieurs interfaces graphiques avec des algorithmes de fonctionnement optimisés.
5. Associer les différentes fonctionnalités des interfaces graphiques aux codes d'étalonnages automatisés.

6. Mettre en œuvre un outil de calcul sur MATLAB® [5], interactive et facile à utiliser qui permet de donner le choix à l'utilisateur de tester différentes procédures d'étalonnages des secousses sismiques.
7. Tester et valider l'outil de calcul en l'exploitant dans le cadre de plusieurs projets de recherche.
8. Utiliser l'outil de calcul (PHASE B).

PHASE B : Étude de la sensibilité de la réponse aux sollicitations sismiques bidirectionnelles

1. Développer plusieurs systèmes structuraux numériques de comportement linéaire élastique et bilinéaire plastique par méthode d'éléments finis ADINA®.
2. Générer un ensemble d'accélérogrammes horizontaux appropriés à l'aide de l'outil de calcul conçu.
3. Étalonner cet ensemble en utilisant différentes définitions des secousses sismiques bidirectionnelles. À savoir, des séismes bidirectionnels étalonnés en utilisant la moyenne géométrique des spectres de réponses (selon la norme) ou des séismes décorrélés et étalonnés de façon individuelle sur un spectre de conception modifié.
4. Faire une étude paramétrique pour évaluer les effets de la représentation de l'agitation horizontale choisie et son orientation sur la réponse des modèles numériques.

1.4 Présentation du mémoire

Ce mémoire s'articule sur cinq chapitres principaux. Notamment, l'introduction et la problématique, la revue de littérature, la présentation de l'outil de calcul, une étude sur la réponse aux sollicitations sismiques bidirectionnelles, et enfin, des conclusions et recommandations pour de futurs développements.

La revue de littérature commence par évoquer la problématique générale concernant le contenu sismique canadien. Elle présente ensuite certaines propositions et normes au sujet de sélection et étalonnage des secousses sismiques, introduit les notions de décorrélations stochastiques et d'axes principales et résume les approches d'étalonnages conventionnelles sur des composantes sismiques bidirectionnelles.

Le chapitre qui suit s'attarde sur la fonctionnalité détaillée de l'outil de calcul développé. L'interface graphique ainsi que l'algorithme derrière vont être déployés. Aussi, des directives sur les différentes approches intégrées dans l'outil de calcul sont fournis.

Un autre chapitre résume les contributions de l'outil de calcul dans différentes domaines de recherches en génie civil. Différentes analyses exécutées, accompagnées des résultats et les conclusions retenues sont présentées. Particulièrement dans ce chapitre, une étude paramétrique de la réponse linéaire d'une structure soumise à des accélérogrammes bidirectionnelles est réalisée.

Pour finir, une conclusion résume les principaux piliers du projet et une recommandation est octroyée. En outre, une liste de suggestions sur des études complémentaire est présentée.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Pour mettre en contexte la problématique, ce chapitre va débuter par la présentation de l'activité sismique de l'Amérique du Nord. En particulier, les zones sismiques considérées comme étant les plus à risques vont être identifiées. Subséquemment, une revue de quelques méthodes de sélection et d'étalonnage des secousses sismiques pour fin d'analyses dynamiques temporelles est présentée. Par ailleurs, le contexte de transformation de ces vibrations selon les directions du sol principales est énoncé. Il s'agit de la notion de décorrélation stochastique d'un séisme. Finalement, plusieurs approches d'étalonnages des secousses horizontales bidimensionnelles sont abordées.

Les sujets abordés dans la revue de littérature sont complémentaires aux chapitres qui suivent. Au premier abord, le contexte sismique canadien, la nature de la vibration du sol ainsi qu'aux différentes propositions concernant la sélection et l'étalonnage des secousses sismiques vont servir à construire un outil de calcul complet et convivial. Pour montrer son utilité, cet outil va être exploité pour tester l'effet d'une agitation horizontale bidimensionnelle à la fois enregistrée et décorrélée et de son orientation sur la réponse d'une structure simplifiée en 2D.

2.2 Activité sismique au Canada

Durant les dernières 125 années, le Canada a connu pas plus que 10 tremblements de terre majeurs de magnitude de 7.0 ou plus. Néanmoins, des tremblements de terre de magnitude variante entre 3.0 et 4.0 se produisent des centaines de fois, chaque année [6]. Au Canada, les données portant sur les séismes historiques ont aidé à distinguer 4 zones de tremblement de terre. On emploie souvent le terme zone sismique pour insinuer des régions ayant une probabilité d'activité sismique commune. Ces zones sont mises en évidence sur la figure 2.1.

Tel que remarqué sur cette figure, on distingue le Centre, le Nord, l'Est et l'Ouest canadien.

- Le Centre et le Nord : Dans la partie centrale du Canada, aucun risque de tremblement de terre important n'existe, alors que dans les régions arctiques, une activité sismique modérée peut se produire [7].
- L'Est : Cette zone sismique se localise dans une région continentale relativement stable. L'activité sismique est donc faible à modérée. Cependant, comme observé dans le passé, des séismes de magnitudes importantes peuvent se reproduire. En réalité, compte tenu de la présence de plaques diffuses mal définies et du manque de failles sismiques, les

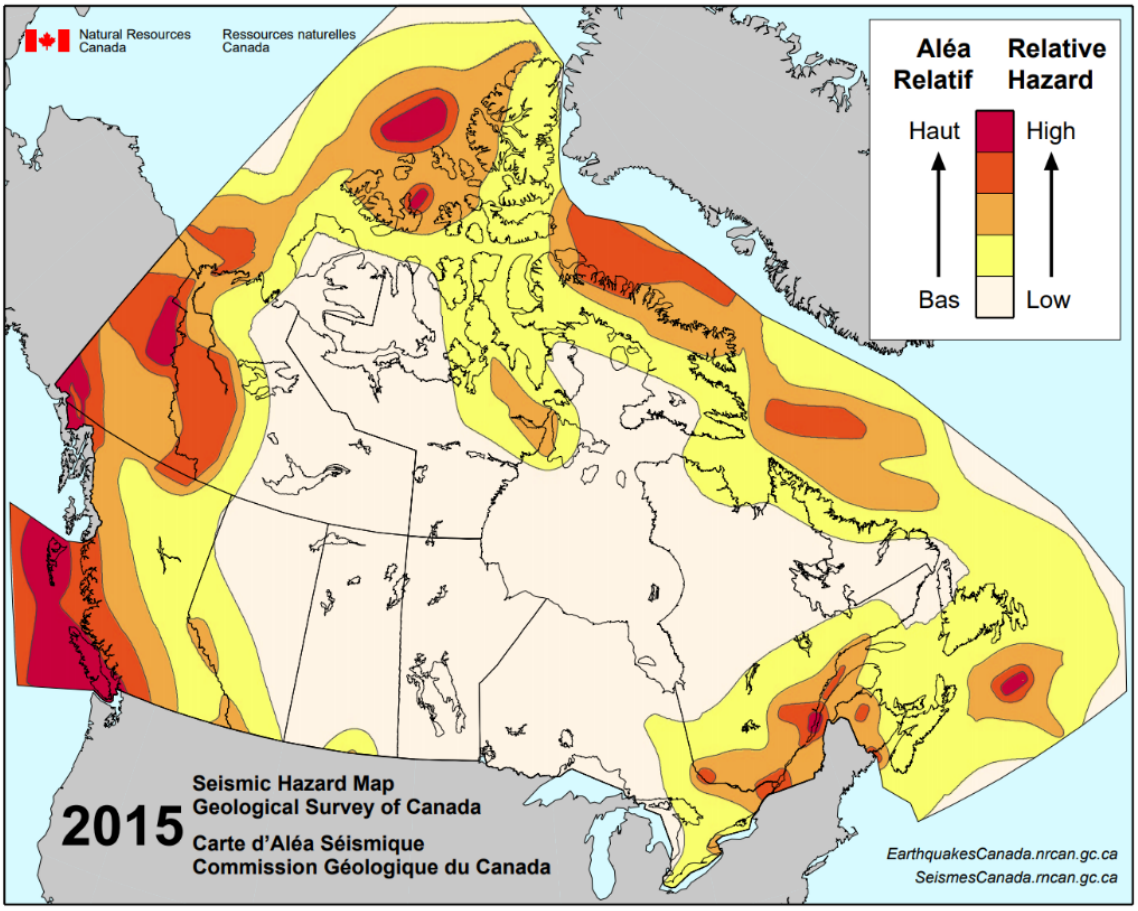

Figure 2.1 Aléa sismique du Canada

causes de tremblement de terre dans l'Est canadien sont difficiles à comprendre [7]. Certains proposent que les tremblements de terres dans cette zone sont principalement causés par un champ de contraintes de compression orienté du nord-est vers l'est, réactivant des zones de faiblesse crustale [8]. Ces zones faibles sont définies par des propriétés mécaniques significativement inférieures à celles de la masse rocheuse environnante [9].

— L'Ouest : L'Ouest du Canada est considéré comme la région la plus sujette aux séismes. Se situant dans une zone sismique active, cette région génère des séismes de magnitude supérieure à 8 (p. ex. le séisme de M = 8,1 dans l'archipel de la Reine-Charlotte en 1949). Par ailleurs, la fréquence sismique est plus importante pour les agglomérations situées à proximité des zones où les failles sont actives. En effet, contrairement à l'Est, la sismicité de cette zone est mieux définie. Son activité sismique est le résultat d'interaction entre trois plaques tectoniques distinctes, à savoir, la plaque de l'Amérique de Nord, du Pacifique et Juan de Fuca [7] (voir figure 2.2).

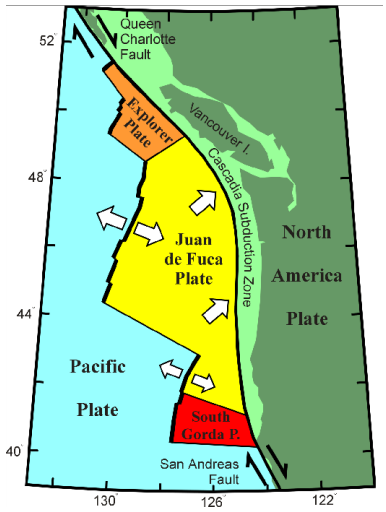

Figure 2.2 Sismicité autour de la plaque Juan de Fuca

2.2.1 Contexte des tremblements de terre dans l'Est Canadien

Suite à des années d'enregistrement de secousses sismiques, il a été possible de délimiter certaines zones sismiques dans l'Est Canadien, soit :

— Nord-Est d'Ontario : Cette zone se caractérise d'un niveau d'activité sismique faible. Jusqu'à 1999, Seulement un à deux tremblement de terre de magnitude supérieure à 2.5 et deux tremblement de terre de magnitude 5 ont été enregistrés(1905, dans le nord de Michigan, et 1928, nord-ouest de Kapuskasing) [7].

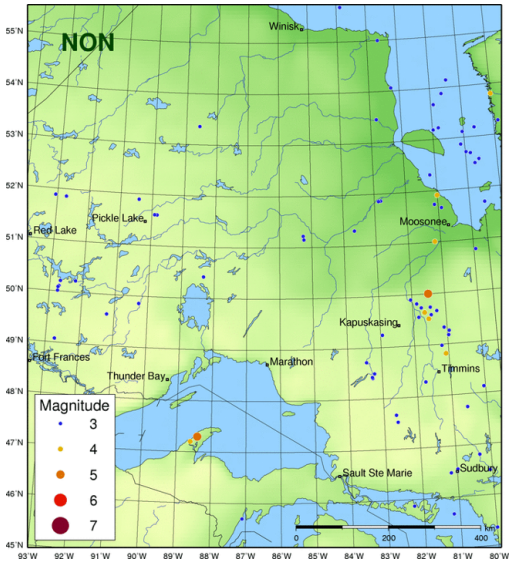

Figure 2.3 La zone Nord-Est de l'Ontario (NON)

— Zone des grands lacs du Sud de l'Ontario : Ayant une activité sismique faible à modérée, cette zone a connu 2 à 3 événements faibles de magnitude de 2.5 et 3 évènements modérés de magnitude 5. Ces derniers ont été largement ressentis mais n'ont pas causé de dégâts [7].

— Ouest du Québec : L'activité sismique dans l'Ouest du Québec s'étend sur un vaste territoire. Ce dernier est divisé en deux bandes distinctes. La première bande suit principalement la vallée de l'Outaouais du Lac Témiscamingue jusqu'à Montréal. La seconde s'étend de Montréal jusqu'au réservoir Baskatong. Les séismes observés dans la première bande sont causés par un réseau de failles normales active depuis 250 à 500 millions d'années. Par ailleurs, pour la deuxième bande, il est spéculé que la présence d'un point chaud sous l'Amérique du Nord est la source la plus plausible des secousses sismiques [10].

  Dans le passé, La zone de l'Ouest du Québec a connu au moins trois séismes ayant une magnitude supérieure à 5. De plus, la région est aussi secouée par d'autre séismes plus faibles mais ressentis par la population locale. Aujourd'hui, en moyenne, un séisme se produit tous les cinq jours (p. ex. le séisme de M = 5,8 dans la ville de Montréal en 1732) [7].

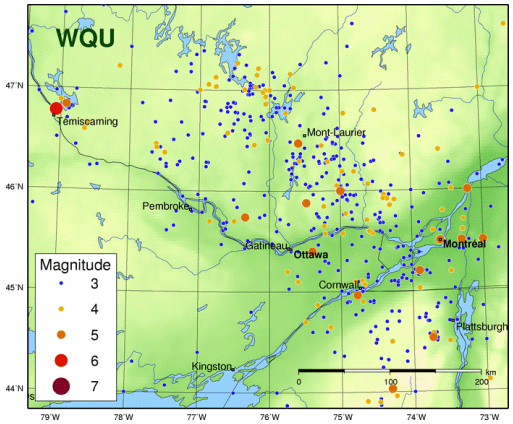

Figure 2.4 L'ouest du Québec (WQU)

— Charlevoix-Kamouraska : Ayant connu cinq séismes de magnitude égal ou supérieure à 6, La zone sismique de Charlevoix est sans doute la plus active dans l'Est canadien. L'activité sismique dans cette zone se situe à l'intérieur du socle précambrien. Elle se concentre principalement sous le fleuve saint Laurent, entre le comté de Charlevoix sur la rive Nord et le comté de Kamouraska sur la rive Sud [7]. Bien qu'aucun mécanisme de rupture n'ait pu être identifié, les facteurs qui contrôlent la séismicité de cette région sont difficiles à comprendre. Avec une profondeur focale de 30 km, les

tremblements de terre se produisent sur le bouclier canadien sous la ligne de Logan et les Appalaches [10].

Depuis 1977, la zone sismique de Charlevoix a connu plus que 200 tremblements de terre par an. De nos jours, un séisme se produit à tous les jours et demi en moyenne [7].

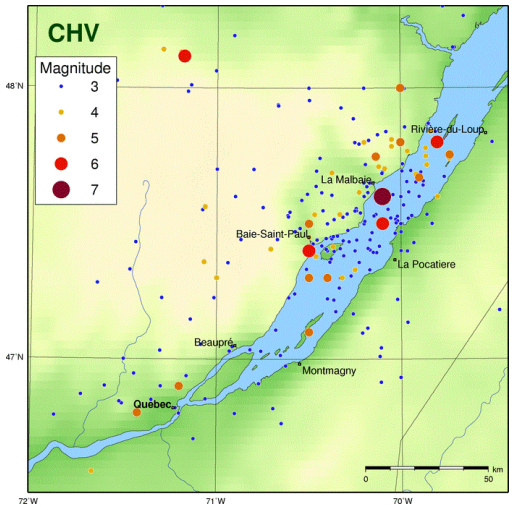

Figure 2.5 Charlevoix-Kamouraska (CHV)

— Bas Saint-Laurent : Le Bas Saint-Laurent est une région localisée sur l'estuaire du fleuve saint Laurent à environ 400 km au Nord-Est du Québec. Comme pour la région de Charlevoix, elle se caractérise aussi par une activité sismique concentrée sous le fleuve saint Laurent. En revanche, aucun tremblement de terre néfaste n'a eu lieu dans l'histoire [7]. Comme pour la plupart des zones sismiques intraplaques, les mécanismes de rupture locaux proviennent principalement des glissements le long des failles normales [10].Chaque année, autour de 60 séismes sont rapportés. Aujourd'hui, la région du Bas Saint-Laurent subit, en moyenne à un tremblement de terre tous les 5 jours [7].

— Nord des Appalaches : C'est une zone où l'activité sismique est dispersée un peu par tout. Elle inclut une grande partie du Nouveau-Brunswick et s'étend jusqu'en Nouvelle-Angleterre. En 1982, une série de secousses sismiques de magnitude 5 s'est produit dans la région de Miramichi. Aussi, plusieurs grands séismes historiques sont produits [7].

— Talus Laurentien : le 18 novembre 1929, un séisme de magnitude de 7.2 s'est produit sous l'océan atlantique à 250 km au sud de Terre-Neuve. Cet évènement appelé séisme de Grand bancs a déclenché un tsunami dévasteur qui a causé la mort de 28 personnes.

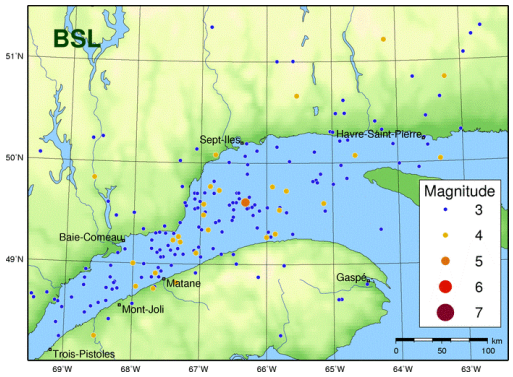

Figure 2.6 Bas Saint-Laurent (BSL)

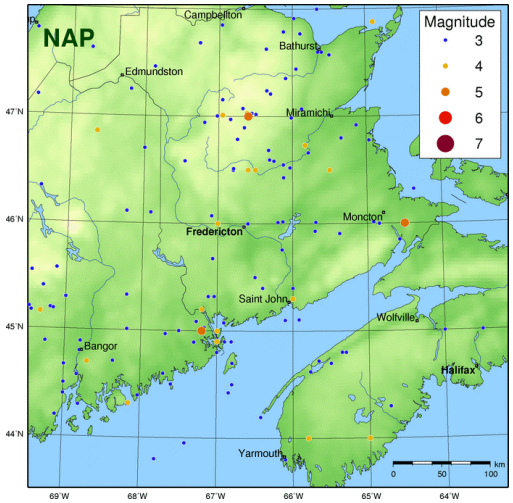

Figure 2.7 Nord des Appalaches (NAP)

Plusieurs séismes importants se sont produits le long de la marge continentale Est du Canada. Cependant, ce séisme fait partie des plus rares événements enregistrés sur la côte de l'atlantique [7].

2.2.2 Contexte des tremblements de terre dans l'Ouest Canadien

Suite à des années d'enregistrement de secousses sismiques, il a été possible de délimiter certaines zones sismiques dans l'Ouest Canadian, soit :

— Région au large : Au nord, une faille résultante d'un glissement latéral entre le Pacifique et l'Amérique du Nord est appelée la faille de la Reine-Charlotte. En 1949, cette faille a causé le plus grand tremblement de terre au Canada, soit le séisme de magnitude 8,1 survenu dans Haida Gwaii (anciennement îles de la Reine-Charlotte) [7]. Dans cette région, d'autre failles de types secondaires sont observées. Aussi, des indications

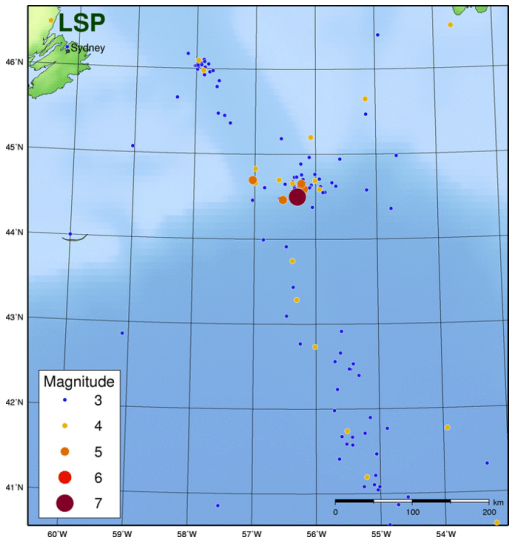

Figure 2.8 Talus laurentien (LSP)

géologiques proposent qu'une plaque continentale couplée avec celle du pacifique génère des zones de compressions importantes. Encore plus au nord, une petite plaque appelée la plaque de l'Explorateur glisse également sous la plaque américaine. En même temps, la plaque Juan de Fuca glisse le long de la faille Nootka. La frontière de ces plaques océaniques contient plusieurs failles secondaires. Cependant, la séismicité de cette zone n'est pas bien définie [10].

— La zone de subduction de Cascadia : À l'Ouest de l'île de Vancouver, la plaque de Juan de Fuca diverge de la plaque du Pacifique avec un taux de vitesse de 2 à 5 cm / année. Plus à l'est la plaque de Juan de Fuca glisse en dessous du continent américain. Ces plaques bloquées l'une contre l'autre ne sont pas en mouvement continu. De ce fait, des contraintes de compression sont cumulées sous formes d'énergie sur les frontières. Des études sismiques envisagent la possibilité qu'un séisme de subduction important survienne à la suite du relâchement de ces deux plaques [7].

— Région de St. Elia et Sud-Ouest du Territoire du Yukon : Cette région subit à un grand nombre de gros séismes, il s'agit de l'une des régions les plus actives au Canada. En effet, le mouvement de glissement entre les plaques du Pacifique et l'Amérique évolue d'un mouvement latéral au subduisant. Une série de séismes, de magnitude supérieure à 7 a causé le soulèvement du sol a une distance figurante à 30 mm / an. Ces séismes se produisent le long des failles Fairweather, Denali et Tintina [7].

— Cordillère méridionale : se situant de 60 de latitude nord du massif, l'activité sismique diminue. Il s'agit de secousses sismiques moins importantes, ayant une magnitude autour de 6 [7].

— Plate-forme intérieure : Cette région se prolonge de la Saskatchewan méridionale au Montana. Le plus gros séisme que cette a connue se caractérise d'une magnitude de 5.5. Quelques séismes associés à l'extraction minière sont aussi détectés [7].

2.2.3 Types d'évènements sismiques dans la région du Cascadia

Les zones de subductions sont celles ou les plaques océaniques plongent dans le manteau terrestre. Aux zones de subduction, quand deux plaques entrent en collision, la plaque océanique caractérisée de plus lourde s'écrase sous la plaque continentale plus légère. La subduction de la plaque océanique provoque une activité sismique élevée. En fait, c'est dans ces zones que se produisent la plupart des grands séismes du monde.

Trois types de séismes se produisent périodiquement dans la zone du Cascadia. Notamment, Les séismes peu profonds, profonds et dans les zones de subductions. Alors que les deux premiers types sont généralement caractérisés par des magnitudes faibles à intermédiaires et par des courtes durée, les séismes dans les plaques subduites sont de durée plus importante [11]. D'ailleurs, chaque type présente des particularités différentes.

— Séismes peu profonds (crustal) : Ce type de séisme est le résultat d'un mouvement d'une couche relativement mince dans la croûte terrestre. En Cascadia, la plupart des séismes sont peu profonds à une valeur d'environ 35 km. Ce type d'évènement provoque des destructions proches de l'épicentre, ou les secousses sont plus fortes. Elles peuvent durer de 20 à 60 secondes. Les répliques sismiques sont courantes. À la suite d'un événement de grande ampleur, on peut s'attendre à des dommages supplémentaires causés par celles-ci [12] [13].

— Séismes profonds (deep interface) : Les tremblements de terre générés dans cette zone causent des dommages beaucoup plus extensifs que la première. Le sol pourrait trembler pendant quatre minutes ou plus à certains endroits. Des répliques de magnitude M7 pourraient se reproduire et causer des dégâts encore plus importants. Contrairement aux séismes peu profonds, Les séismes profonds (deep interface) peuvent être la source d'un tsunami destructeur, en générant une série de vagues atteignant 10 mètres de haut [12] [13].

— Séismes dans les zones de subductions (deep in-slab) : Ces séismes se produisent à des profondeurs de 45 km. L'énergie sismique émise de ce type de séismes s'étend sur une surface beaucoup plus grande que dans un séisme peu profond. Par conséquent, les secousses sismiques sont moins fortes, mais affectent une zone plus étendue. Peu de répliques séismiques se reproduisent [12] [13].

2.2.4 Différences et similarités entre l'Est et l'Ouest Canadien

Dans l'optique de comprendre les différences et les similarités entre la sismicité à l'Est et l'Ouest canadien, certains facteurs sont présentés. Au premier abord, compte tenu de l'histoire géologique, la période de retour dans l'Ouest semble être deux à trois fois plus courte que dans l'Est continentale [10]. En effet, comme démontré sur la figure 2.9, on remarque que le contenu en fréquence associé aux mouvements du sol est beaucoup plus élevé à l'Est qu'à l'Ouest. Ceci est vrai seulement pour les séismes peu profonds (crustal). Une autre différence basée sur les travaux de Nuttli, propose qu'un séisme de magnitude 7 à l'Est des États-Unis causerait des vibrations sur une distance dix fois plus grande qu'en Californie [14]. Bien évidemment, Ceci est retenu de la même manière au Canada. En effet, les ondes sismiques dans l'Est ont un taux d'atténuation plus faibles qu'a l'Ouest [15]. Par conséquent, ils peuvent être ressentis à une distance plus longue de l'épicentre. Par exemple, le séisme de Saguenay en 1988 a été ressenti au sud jusqu'à Washington, DC et à l'Ouest jusqu'à Thunder Bay. Cet évènement démontre parfaitement la différence dans l'atténuation des ondes sismiques dans les deux régions. Dans le même ordre d'idées, les mécanises de rupture associées à l'Ouest s'étendent jusqu'à la surface. À l'encontre de ce qui vient d'être dit, aucun séisme, à l'Est ne prouve la présence d'un système de faille active en surface. C'est pourquoi les évidences géologiques à l'Ouest restent beaucoup plus concrètes alors que l'explication d'un événement sismique à l'Est est difficile à définir. Une seule similarité est axée sur la profondeur focale. Dans les deux régions, les ondes sismiques se libèrent d'une profondeur variante entre 5 et 15 km. Toutefois, la zone de subduction de Cascadia à l'Ouest est exclue de cette intervalle, ou les points focaux peuvent être beaucoup plus profond.

2.3 Séismes étudiés

Une conception parasismique requiert d'utiliser une estimation fiable des chargements sismiques auxquelles une structure pourrait être exposée au cours de sa vie. En raison d'une variation de propriétés physiques, la majorité des ouvrages d'arts se caractérisent d'un comportement non linéaire. Ainsi, pour évaluer ce comportement de façon réaliste, des analyses dynamiques non linéaires sont primordiales. Il s'agit d'étudier la réponse d'une structure suite aux mouvements du sol. Notamment, des mouvements de sols enregistrés pendant un évènement historiques ou des mouvements simulés.

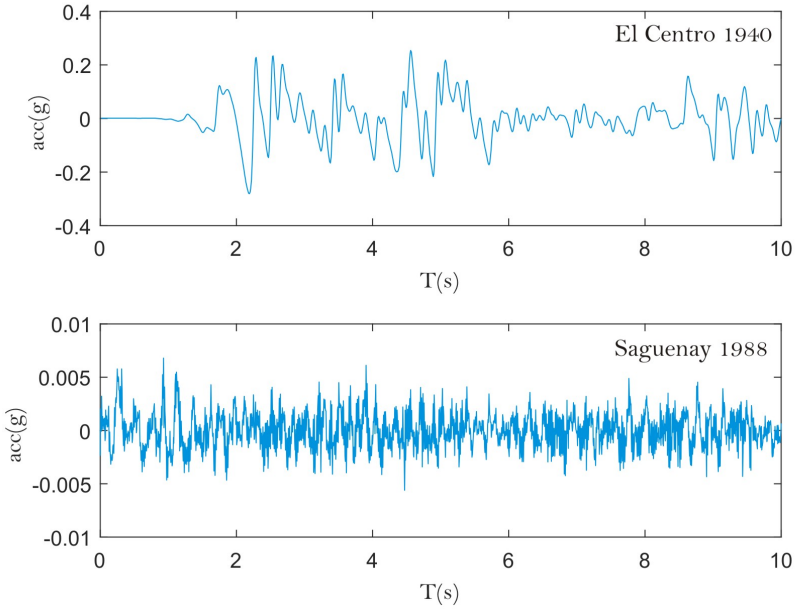

Figure 2.9 Accélérogrammes enregistrés à l'Est et l'Ouest Canadien (peu profonds)

2.3.1 Sismicité historique

Montant à plusieurs siècles, certaines incertitudes existaient au niveau des paramètres sismiques. À savoir, la magnitude, l'intensité et l'origine des propagations sismiques. À partir du 20ème siècle, les études de sismicité instrumentale commencent à émerger. Il s'agit d'une liste d'enregistrement numériques provenant d'un réseau de sismographes installés dans la région. Ces enregistrements plus rentables et de qualité essentielle, permettent de déterminer de façon plus précise la localisation et la magnitude d'un tremblement de terre. Un exemple d'évènement marquant de la sismicité historique à l'Est du Canada est présenté :

— Nahanni *23 Décembre 1985-M6* ; Ce séisme s'est produit aux Territoires du Nord-ouest à une profondeur focale de 6 km [16]. Étant donné que le foyer sismique se trouvait à 100 km loin de la communauté, aucun dommage structurel majeur n'a été enregistré [7]. Après certaines études, les sismologues ont conclu que cet événement a été causé par une poussée. Le plan de faille souterrain s'est avéré être un plan de pendage vers l'ouest. Bien que ce séisme se soit produit au milieu de la plaque continentale, ses particularités sont semblables aux évènements enregistrés à l'Est canada. D'où sa pertinence comme séisme de référence [17].

2.3.2 Sismicité simulée

Dans les zones ou les réseaux sismiques sont faibles, le code national du bâtiment autorise l'utilisation des excitations sismiques simulées. Principalement, grâce au fait qu'elles peuvent refléter de façon pratique, les mécanismes de failles et les paramètres sismiques de la région. Ainsi, en évaluant leur contenu en fréquence, en amplitude et leur correspondance avec les enregistrements réels. Ces signaux synthétiques peuvent représenter de manière réaliste les différents aspects qui contrôlent la réponse de la structure maximale.

Atkinson Gail a développé un modèle de simulation pour chaque type d'évènement sismique [18]. Ceci, par le biais de la méthode stochastique à source ponctuelle.

Pour l'Est du Canada, une base de données englobant un total de 180 accélérogrammes est développée. Celle-ci est divisée en quatre séries de 45 accélérogrammes simulés. Les simulations sont classées par magnitude, distance épicentrale et par classe de site (A, C, D et E). Pour Les deux premières séries, un ensemble de secousses issus d'événements de magnitude M6.0 a été créé pour des courtes distances (10-15 km) et plus longues (20-30 km). Les deux dernières séries sont simulées à partir des évènements de magnitude M7. De la même manière, elles comprennent une plage de distances courtes (15-25 km) et longues (50-70km). Des registres sont fournis gratuitement au site Web www.seismotoolbox.ca.

L'aléa sismique de la côte ouest canadienne dépend du type du tremblements de terre. À des courtes périodes, l'UHS est dominé par des séismes peu profonds à des distances focales inférieurs à 50 km. Alors que la période augmente, les événements sismiques dominants ont des magnitudes et des profondeurs encore plus importantes, à savoir, les séismes profonds et intraplaques [19].

2.4 Sélection et étalonnage des secousses sismiques

Un tremblement de terre se traduit sous forme de déplacement, de vitesse ou d'accélération de sol (voir Figure 2.10). Ce signal complexe transformé en spectre de réponse sismique [1], est primordial. Il peut être enregistré de façon naturelle ou généré de façon artificielle. Le code national du bâtiment (CNB 2015) exige que le spectre de réponse sismique soit compatible avec le spectre cible [2].

Bien qu'on dispose de plusieurs méthodes systématiques et utiles à cet effet, certaines restent ambigus et peu d'investigations sont établies sur leurs effet. Une étude de la part de Kalkan et Chopra [20] souligne que les différentes procédures de sélection et d'étalonnage induisent

1. Voir section 2.4.2
2. Voir section 2.4.2

des variations inacceptables au niveau de la réponse structurelle inélastique. Des opinions diffèrent quant aux critères de sélection, de compatibilité et au nombre de secousses sismiques à utiliser.

Généralement, pour une analyse non linéaire, les secousses sismiques sont pré-sélectionnées en évaluant les scénarios (M-R) qui contribuent le plus à l'aléa sismique de la zone étudiée [21]. Ensuite, la compatibilité entre le spectre de réponse et le spectre cible est atteinte par deux moyens. Soit, en modifiant l'amplitude des enregistrements sismique par un scalaire linéaire ou en modifiant le contenu fréquentiel par « Spectral Matching ». La première approche est souvent adoptée, car elle préserve les paramètres sismiques des enregistrements [22]).

Une question critique se pose aussi sur l'importance de la période autour de laquelle l'étalonnage doit être fait. Certaines procédures recommandent un intervalle qu'ils considèrent apte à bien modéliser le comportement de la structure. D'autres proposent que les deux spectres soient appariés autour de la période fondamentale de la structure étudiée. Des informations complémentaires sont nécessaires pour évaluer l'effet des ces approches sur la réponse inélastique structurelle.

Des recherches antérieures ont démontré que certaines méthodes d'étalonnages peuvent introduire une grande dispersion dans les demandes sismiques estimées. Les estimations de la demande résultantes peuvent être biaisées, conduisant à des conceptions avec une incertitude significative et des marges de sécurité inconnues, à moins d'utiliser un ensemble relativement grand d'enregistrements de mouvements du sol [23] [24] [25] [26] [27].

Aujourd'hui, les critères de sélection et d'étalonnage d'un séisme font toujours l'objet de discussions et de débats parmi les différents communautés et particuliers concernés par le domaine.

2.5 Méthodes de sélection des secousses sismiques

Pour fin d'analyses dynamiques temporelles, la sélection d'un ensemble de secousses sismiques approprié est une étape clé dans l'évaluation de la performance d'un système structurel. Habituellement, les mouvements du sol sélectionnés proviennent des enregistrements historiques disponibles dans des bases de données publiques tel que, PEER NGA, COSMOS ou K-NET. En cas de manque d'enregistrements historiques, ces mouvements peuvent être basés sur des simulations représentatives de l'aléa sismique.

L'idéal est de sélectionner des secousses sismiques qui sont convenables à la structure analysée et à sa localisation. Les paramètres de sélections ont une grande influence sur la réponse spectrale. Parce que les spectres de réponses reflètent la demande sismique, il est important

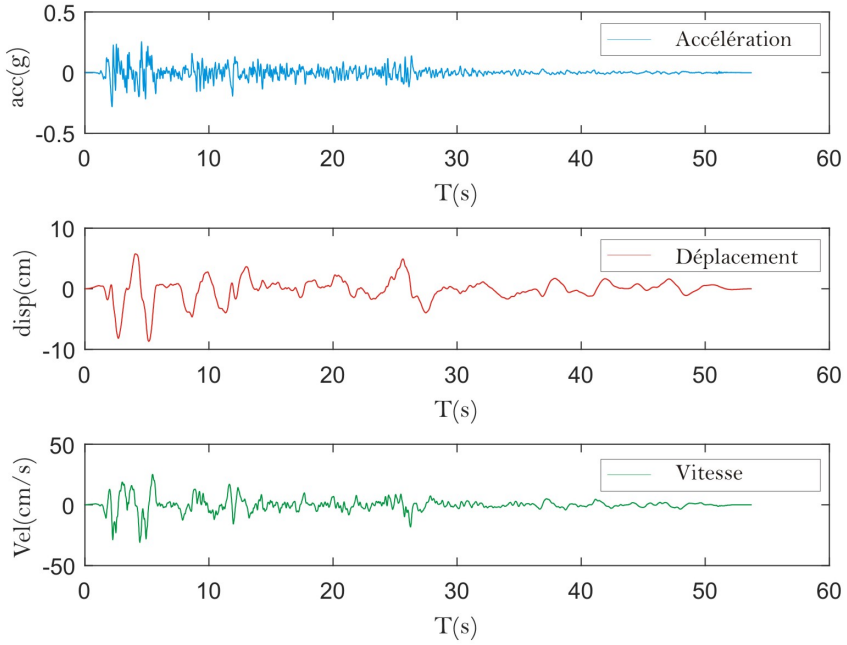

Figure 2.10 Station El Centro Array #9, Azimut 180, M6.95, Fault type strike slip, $\bar{V}_s = 30\ m/s$

de considérer ces paramètres de façon judicieuse [20]. Graizer et Kalkan [28] identifient ces paramètres comme suit : Magnitude (M) et distance (R), Type et état du sol ainsi que les effets de directivités.

— Scénarios (M, R, ϵ) : La méthode de sélection proposée commence par la désagrégation de l'aléa sismique du site. Cette technique est le résultat d'une analyse probabiliste correspondant à une certaine probabilité de dépassement. Elle permet d'identifier les événements qui contribuent le plus à l'aléa sismique. Ces événements sont caractérisés par une magnitude (M) et une distance hypo-centrale (R). Les résultats sont présentés par l'intermédiaire d'un histogramme proportionnel à la contribution de chaque évènement. Le facteur ϵ est rajouté par McGuire en 1995 pour prendre en considération l'incertitude sur l'accélération spectrale obtenue [29]. Selon Little [30], les scénarios (M, R) des secousses sismiques candidates doivent être similaires à celle du spectre de conception. Typiquement, une erreur de $\mp$ 0.2M à $\mp$ 0.5M est acceptée pour les magnitudes et $\mp$ 50% pour les distances hypo-centrales. Un exemple de désagrégation de l'aléa d'un site de classe A situé à Vancouver pour une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans est présenté sur la figure 2.11. Dans cette dernière, chaque colonne de l'histogramme représente la contribution d'un évènement sismique pour

une probabilité de dépassement définis.

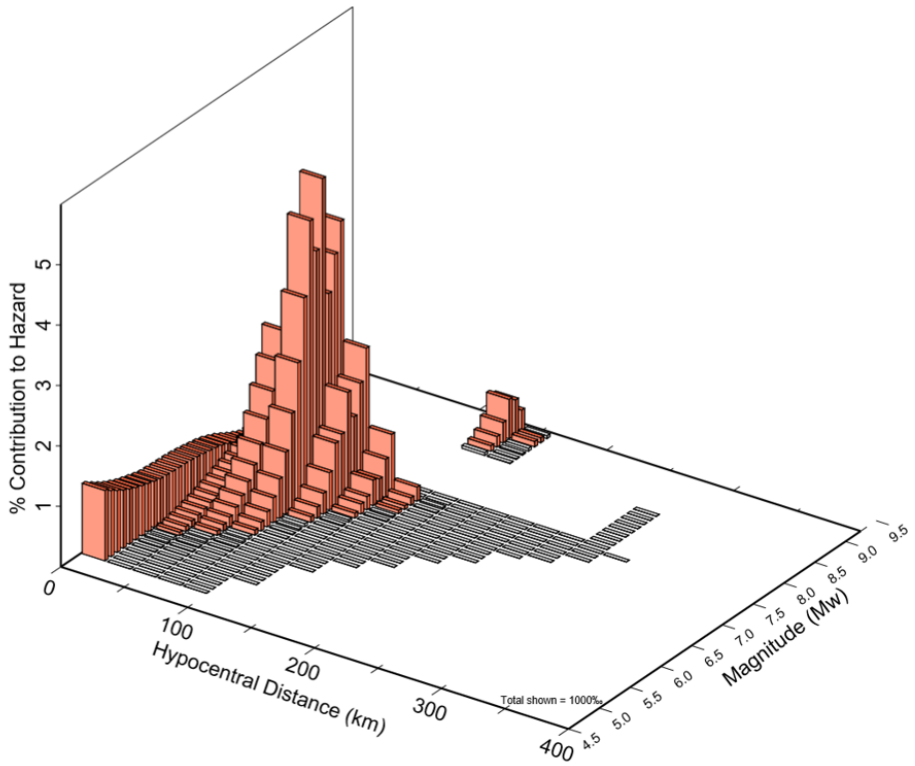

Figure 2.11 Courbe de désagrégation pour Vancouver, BC at 49.250 N 123.120 W , site de classe C, probabilité de dépassement de 2 % en 50 ans pour $T = 0.05s$

— Paramètres tectoniques et géologiques : les secousses sismiques doivent provenir d'un contexte sismique similaire. Pour une structure localisée à Vancouver, les séismes doivent provenir des zones de subduction (peu profonds et profonds). Pareillement, ils doivent être causés par des mécanismes de failles semblables, à titre d'exemple, latéraux ou normaux. Il est a noter que le type de faille n'est pas un critère important du processus de sélection préliminaire. Cependant, pour les sites proches de la source ($<$ 10 km), les enregistrements qui prennent en compte les effets de directivité doivent être considérés [30]. Selon Baker [31], cette directivité liée à la propagation d'un bout à l'autre de la faille, est traduite par la présence d'une longue impulsion sur le vélocigramme, idéalement, dans la direction horizontale perpendiculaire à la faille.

— Conditions du site : Le type du sol a un effet majeur sur le contenu fréquentiel de son mouvement. Pour un sol lâche, les secousses sismiques à basse fréquence sont amplifiées. Cependant, les mouvements à haute fréquence sont atténués. Par ailleurs, parce que le roc est très rigide, le contenu fréquentiel est beaucoup plus amplifié à hautes fréquences. Mais, au niveau de la période prédominante, la forme spectrale

d'un site rocheux est inférieure à celle d'un site lâche [32]. Il est souvent difficile de trouver des secousses sismiques ayant des conditions du sol semblable au site. Une approche consiste à sélectionner des enregistrements sur des sites rocheux, puis à incorporer les conditions de sol et les propriétés du site dans la conception [30].

2.6 Méthodes d'étalonnage des secousses sismiques

Cette section présente les principales lignes directives pour l'étalonnage d'un séisme. Le CNBC 2015, exige que les accélérogrammes sélectionnés, pour l'analyse dynamique soient compatibles avec le spectre d'aléa uniforme. Dans la littérature, de nombreuses méthodes d'étalonnage sont proposées. Pour cette étude, un total de six méthodes sont présentées. Ces méthodes ont des directives différentes, mais sont tous basées sur le même principe. Il s'agit de l'application d'un scalaire sur l'accélérogramme, de façon que son spectre de réponse soit le plus proche possible du spectre cible.

2.6.1 Méthode du CNB2015

Les sections qui suivent traitent les directives d'étalonnage des secousses sismiques, prescrites dans le commentaire J du CNB2015.

Spectre de conception, S(T) :

Un objectif commun des analyses sismiques probabilistes ($PSHA$) et déterministes ($DSHA$) est d'identifier le spectre de conception à utiliser, en vue d'analyses structurelles ou géotechniques. En pratique, une des approches communément utilisée par les ingénieurs consiste à représenter le mouvement du sol par un spectre de réponse élastique. C'est une courbe qui décrit les valeurs spectrales auxquelles une structure doit résister autour de sa période de vibration. Ceci, pour la même probabilité de dépassement. Ce spectre change d'un site à un autre en fonction du type de sol, de l'amortissement et de l'aléa sismique.

Dans le code national du bâtiment (CNB 2015), l'aléa sismique est défini par des valeurs d'accélération spectrale à des périodes de 0.2, 0.5, 1, 2.0, 5.0 et 10.0. L'amortissement est de 5% et la période de retour est de 2500 ans. Tous les paramètres sont exprimés en fraction de g (gravité). La section 4.1.8.4.9 de la division B introduit les différentes étapes d'élaboration d'un spectre de conception. L'amplification maximale au plateau ne reflète pas nécessairement la demande sismique à des courtes périodes, elle vise plutôt à réduire la demande en ductilité due à l'allongement de période quand la structure plastifie [19].Il est donc permis d'obtenir S(T) pour des périodes inférieures à 0.5 s en utilisant l'interpolation linéaire entre F(PGA)PGA, F(0.05)Sa(0.05), F(0.1)Sa(0.1), F(0.2)Sa(0.2), F(0.3)Sa(0.3) et F(0.5)Sa(0.5).

Les valeurs de F(0.05), F(0.1) et F(0.3) seront données dans les commentaires J du CNB. Sa(0.05), Sa(0.1) et Sa(0.3) sont disponibles sur le site de la commission géologique du Canada au www.earthquakescanada.ca. Des exemples sont montrés sur la figure 2.12 pour des sites situé à Vancouver, British Colombia.

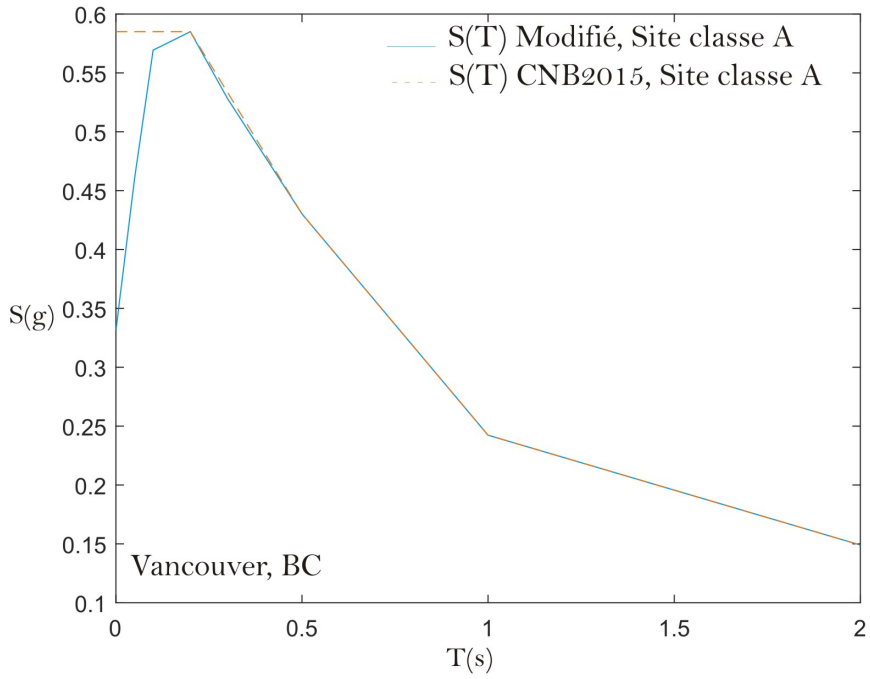

Figure 2.12 Exemple du spectre cibles tiré du CNB2015 et modifié

Pour plus de détails sur les analyses probabilistes et déterministes, l'article *"An introduction to probabilistic hazard analysis (PSHA)"* de Jack W. Baker est une excellente référence [33].

Spectre cible, $S_T(T)$:

Le spectre de réponse est un outil d'estimation de la réponse maximale d'un ouvrage sous sollicitation sismique. On entend par réponse, le calcul des déplacements, vitesses et accélérations subis par celui-ci. Cette réponse maximale est obtenue systématiquement pour un ensemble d'oscillateurs simples pour une gamme de périodes et d'amortissement possibles. Le CNB2015 prescrit de calculer les amplitudes à des incréments de 0.02 s sur la période cible. Au moins 20 valeurs d'accélérations spectrales doivent couvrir cette dernière. Le rapport d'amortissement à utiliser doit correspondre à celui du spectre cible. Selon les exigences du code, le spectre de réponse doit être compatible avec le spectre cible $S_T(T)$. Ce dernier correspond au spectre de conception sur une période cible TR.

Deux méthodes sont proposées, premièrement la méthode A défini sur la section 2.1.2.a du

commentaire J ou le spectre de réponse doit couvrir le spectre cible sur toute l'intervalle de la période concernée. Les enregistrements sélectionnés pour produire les spectres de réponses doivent respecter les réglementations mentionnées sur la section 2.4.1. Dans la mesure du possible, il est préférable de ne pas sélectionner plus de deux enregistrements provenant du même évènement sismique.

La méthode B défini sur la section 2.1.2.b du commentaire J, devrait être utilisée pour toute structure soumise à des secousses provenant de différents événements sismiques. En effet, le code national du bâtiment (CNB2015) permet à l'ingénieur d'utiliser un spectre cible $S_t(T)$ composé de plusieurs spectres (S_{T1}, S_{T2},etc). Ceux-ci sont établit en évaluant les couples (M-R) qui décrivent chaque scénario (i=1, 2,...). Par exemple, une structure qui se situe dans les zones de subductions de Cascadia peut être vulnérable à trois types d'évènements sismiques. À savoir, des séismes provenant des zones peu profondes (crustal), profondes (interface) et de subductions (in-slab). Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser des spectres cibles caractérisant chaque source d'événement sismique. Aussi, l'utilisation d'un spectre de conception CMS (Conditional Mean Spectrum) est permis. L'enveloppe des différents scénarios des spectres cibles ne devrait être nulle part inférieure à 75% du spectre de conception S (T), sur la plage de période TR.

Intervalle de période cible, TR :

Le CNB 2015 propose aussi de définir une plage de période qui admet tous les modes de vibration contribuant de façon significative à la réponse de la structure. D'une part, la limite supérieure de cette plage assure qu'il y'ait assez d'énergie pour exciter la structure après avoir rentré dans l'état inélastique. D'autre part, la borne inférieure est intentionnellement formulée pour fournir une estimation conservatrice de la période fondamentale. Ainsi, elle permet d'inclure tous les modes de vibrations supérieures.

— Pour un modèle numérique 2D, l'intervalle de période ciblée est défini comme suit :
  $T_{min} = min[0.15T_1, T_{90\%}]$ et $T_{max} = max[2.0T_1, 1.5]$
  Où : T_1 est la période fondamentale dans la direction étudiée.
  $T_{90\%}$ est le mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée.
— Pour un modèle numérique 3D, l'intervalle de période ciblée est défini comme suit :
  - *Cas 1 : S'applique dans le cas d'un accélérogramme de direction horizontale ou d'un pair d'accélérogrammes orthogonaux sur le plan horizontal.*
    $T_{min} = min[0.15T_{court}, T_{90\%|1}, T_{90\%|2}]$ et $T_{max} = max[2.0T_{long}, 1.5]$
  - *Cas 2 : S'applique dans le cas de présence d'un accélérogramme avec une composante verticale.*
    $T_{min} = min[0.15T_{court}, T_{90\%|1}, T_{90\%|3}, T_{90\%|2}]$ et $T_{max} = max[2.0T_{long}, 1.5]$

Où : T_{court} est La période fondamentale minimale dans les deux directions orthogonales.
T_{long} est la période fondamentale maximale dans les deux directions orthogonales.
$T_{90\%|1}$ est le mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée dans la direction horizontale première.
$T_{90\%|2}$ est le mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée dans la direction horizontale seconde.
$T_{90\%|3}$ est le mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée dans la direction verticale.

Pour le scénario où le tremblement de terre provient de plusieurs sources tectoniques, l'intervalle de période cible doit être subdivisée en sous intervalles (TRS, TRS1, TRS2,...). Ceci, pour définir chaque environnement tectonique contribuant à l'aléa sismique. Ces sous intervalles peuvent se superposer mais doivent couvrir la plage de période [T_{min}, T_{max}] au complet.

Nombre d'accélérogrammes minimal :

Dans le cas où on dispose d'une base d'enregistrements sismiques assez riche et adéquate, un total minimal d'onze accélérogrammes est requis. Si le séisme provient de plusieurs sources tectoniques, le nombre minimal d'accélérogrammes utilisé pour chaque scénario devrait être cinq.

Composantes sismiques :

Pour une analyse dynamique unidirectionnelle, les mouvements du sol doivent consister à des accélérogrammes horizontaux uniques appropriés. Dans le cas d'une analyse dynamique bidirectionnelle, des paires de composantes orthogonaux peuvent être utilisées. Préférablement, provenant du même séisme et de la même station. Pareillement, si les composantes verticales sont requises, elles doivent consister aux même séismes et stations des composantes horizontales.

Spectre cible pour la composante verticale :

L'utilisation des mouvements du sol verticaux n'est pas toujours requise. Au besoin, les spectres cibles verticaux peuvent être développées par des relations entres les composantes horizontales et verticales. Principalement, ces relations dépendent des conditions géologiques du site. Pour déterminer celui-ci de façon simplifié, un facteur de 2/3 peut être appliqué sur le spectre cible horizontale.

Facteur d'étalonnage :

Chaque accélérogramme doit être étalonnée individuellement de sorte que son spectre de

réponse excède ou égal le spectre cible. Pour une analyse bidirectionnelle, le facteur d'étalonnage doit être calculé sur la moyenne géométrique de deux composantes horizontales. Dans le cas ou le spectre de réponse moyen est 10% inférieur au spectre cible sur la période d'intérêt, un deuxième facteur d'étalonnage est requis. Lorsque les facteurs d'étalonnage sont excessivement faibles ou importants (inférieurs à 0.5 ou supérieurs à 4.0), cela pourrait suggérer que les accélérogrammes sélectionnés ne sont pas compatible avec les conditions listées sur le paragraphe 2.4.1. Il serait donc nécessaire de réviser le choix des accélérogrammes.

Étalonnage de la composante verticale :

En cas d'absence du spectre cible vertical, le facteur d'étalonnage calculé pour la composante horizontale(s) correspondante peut être utilisé pour la composante verticale. Ceci est valide seulement lorsque des composantes sismiques historiques sont utilisées. En cas d'utilisation des mouvements de sol simulés, un facteur d'étalonnage doit être calculé en utilisant un spectre cible vertical en suivant les mêmes procédures d'étalonnage pour les composantes horizontales.

Étalonnage sur le domaine fréquentiel ou temporel :

Les techniques d'étalonnages par modification dans le domaine fréquentiel ou temporel sont permises. Néanmoins, elle doivent être utilisées avec prudence, en évaluant soigneusement les enregistrements d'accélérations, de vitesses et de déplacements avant et après étalonnage. Si cette méthode est optée, le spectre de réponse moyen ne devrait pas être inférieur à 110% du spectre cible $S_T(T)$ dans la plage de période TR.

2.6.2 Méthode du ASCE/SEI 7-10

Cette section discute des recommandations du chapitre 16 de la norme ASCE/SEI 7. Tout d'abord, le spectre de conception cible a plusieurs définitions dans cette norme. Selon ses besoins, l'ingénieur peut opter pour l'utilisation d'un UHS, CMS, CS ou d'un MCE_R. Des définitions détaillées des 3 premiers spectres de réponse sont disponibles sur Haselton et al [34]. Aussi, un exemple de développement du spectre MCE_R est fourni sur Zimmerman et al [35].

Pour une prévision de la réponse moyenne, l'analyse requiert sept enregistrements sismiques mais permet également une analyse utilisant aussi peu que trois mouvements de sol. Des études antérieurs [36] ont évalué l'erreur potentielle dans les réponses structurelles prédites en fonction du nombre des secousses sismiques. Les résultats ont montré que lorsque onze mouvements sismiques sont utilisés, les paramètres de réponses moyens sont prédits à un niveau de confiance de 70%. Tandis que les résultats pour seulement trois mouvements du

sol ont démontré une variabilité significative. Fondé sur cette étude, Haselton et al [34] recommandent l'utilisation d'un minimum de 11 secousses sismiques.

Les spectres de réponses devraient être étalonnés sur une plage de période bornée entre $T_{min} = min[0.2T, T_{90\%}]$ et $T_{max} = 2.0T$. où T est la période fondamentale maximale dans les deux directions de translations et de torsion et T90% est la période minimale dans les deux directions de translations, dont 90% de la masse modal est représentée.

Pareillement que le code canadien, des enregistrements horizontaux uniques devraient être utilisés pour des analyses unidimensionnelles. Des paires orthogonales sont requises pour des analyses tri-dimensionnelles. L'utilisation d'enregistrements simulés est autorisée, lorsque le nombre de mouvement historique est insuffisant. Chaque composante sismique est étalonnée par un facteur identique appliqué à ses deux ou trois composantes, de sorte que le spectre de réponse moyen ne tombe pas en dessous du spectre cible. Aussi, le code exige que le spectre de réponse moyen ne soit pas plus de 10% inférieur au spectre cible, pour une plage de période considérée. Une limite de facteur d'environ 0,25 à 4,0 est courante.

2.6.3 Méthode MSE

MSE « Mean square error » est un indicateur d'erreur entre le spectre cible et celui de réponse. Le facteur d'étalonnage proposé par cette méthode est déterminé par itération en minimisant l'indicateur MSE sur la plage de période cible. Cette dernière peut inclure des périodes plus courtes ou plus longues que la période fondamentale. Respectivement, en raison d'effets des modes supérieurs et en raison de ramollissement de la structure lors d'une réponse inélastique. La méthode MSE est présentée en détail dans le rapport technique de PEER [37]. Généralement, cette méthode est préférée car elle donne un spectre initial très proche du spectre cible. Toutefois, elle peut induire à des grandes dispersions sur les valeurs d'accélérations spectrales locales, et en particulier après l'étalonnage sur la moyenne pour répondre aux exigences de conception [38].

2.6.4 Méthode PGA

L'approche la plus précoce consiste à ajuster l'accélérogramme en le modifiant par un rapport entre le PGA cible et le PGA de réponse. Cependant, cette méthode, cependant, produit des estimations imprécises avec une grande dispersion des valeurs EDP. D'autres mesures d'intensités (IM) telles que : EPA, EPV et AI se sont également révélées inexactes et inefficaces avec une dispersion significative dans le spectre de demande d'accélération non linéaire sur de longues périodes [23] [26] [27] [39]. Cette méthode est aussi fortement critiqué compte

tenu de sa négligence du contenu fréquentiel [40].

2.6.5 Méthode $S(T_1)$

Shome et Cornell [26] ont proposé une méthode permettant d'étalonner les spectres de réponses autour de la période naturelle de la structure. Il s'agit d'un rapport entre l'accélération spectrale cible et de réponse. Cette méthode ne prend en considération ni les modes de vibration supérieurs, ni l'allongement de la période fondamentale dû à la plastification de la structure. Pour cette méthode, les indicateurs de dispersion dans les estimations de la demande sont considérablement minimes autour de la période de la structure linéaire-élastique To. Cependant, l'efficacité de cette méthode décroit à mesure que les modes de vibration élevés deviennent importants [27].

2.6.6 Méthode T_2-1.2T_1 (Partial Spectral Area)

Dans cette méthode, le facteur d'étalonnage est calculé en utilisant un rapport entre la surface sous le spectre d'accélération cible et celle du spectre de conception. Ceci, entre la seconde période du mode de vibration T_2 et 1,2 fois la période fondamentale T_1. Aussi, cette plage de période est supposée prendre en considération le comportement de la structure en vibration.

2.6.7 Post-Sélection des secousses sismiques

Les méthodes de sélections initiales sont de nature géophysiques. En d'autres termes, elles dépendent de la magnitude, la distance, le type de faille et le type du sol. Ces critères sont généralement utilisés pour trouver des enregistrements sismiques compatibles à l'aléa, à partir d'une base de données disponible. Lorsque la sélection est limitée aux critères mentionnés, un large nombre d'enregistrements compatibles peut être récupéré, posant à l'ingénieur une difficulté sur le choix d'accélérogrammes étalonnés dans un très grand lot. Il est donc nécessaire de réduire la liste d'enregistrements issue de la sélection initiale par un processus de raffinement systématique [41].

L'ingénieur peut opter pour un raffinement aléatoire. Néanmoins, cette approche peut entrainer à une forte dispersion sur les estimations des paramètres de demande. Certes, l'imposition des contraintes de sélections supplémentaire peut remédier à cette dispersion. En revanche, elle peut entraîner la récupération d'un nombre d'enregistrement sismique moins que requis [42].

Les méthodes d'étalonnages conventionnelles utilisent souvent des contraintes imposées par des techniques d'optimisation. Elles permettent de sélectionner des enregistrements sismiques

ayant une forme spectrale similaire à la cible. Lors de l'utilisation de ces techniques, les contraintes et les exigences du code doivent simultanément être respectés. Parmis ces techniques :

1. *Écart type* : l'écart type est calculé pour le rapport entre spectre de réponse et le spectre cible en tout point. Ensuite, les enregistrements sismiques requis ayant les écarts type les plus faibles sont sélectionnés.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(k_i - f)^2}$$

2. *Mean Square Error (MSE)* : Les facteurs d'étalonnage sont calculés de façon à minimiser le MSE entre le spectre cible et de réponse autour de la plage de période considérée. Ce paramètre est calculé en fonction de la différence du logarithme naturel de l'accélération spectrale.

$$MSE = \frac{\sum_i w(T_i)\{ln[S(T_i)] - ln[f \times S_r(T_i)]\}^2}{\sum_i w(T_i)}$$

3. *Sum of Square Errors (SSE)* : Les facteurs d'étalonnage peuvent également être calculés en minimisant la somme des erreurs au carré (SSE) entre le spectre cible et le spectre de réponse autour de la plage de période considérée.

$$SSE = \sum_1^n log(S(T_i) - S_s(T_i))^2$$

Les paramètres MSE et SSE sont exprimés en termes d'accélérations spectrales logarithmiques naturelles, car les mouvements du sol dus aux tremblements de terre sont supposés être log-normalement distribués [43].

En pratique, d'autres approches de raffinement ont été suggérées [44] [45] [46] [47].

2.7 Orientation critique des secousses sismiques

La conception parasismique des systèmes structurels importants, tels que les ponts routiers, les barrages, les centrales nucléaires, etc., nécessite souvent des analyses de réponse dynamique en trois dimensions utilisant des excitations sismiques à trois composantes. Les événements sismiques sont généralement caractérisés par trois composantes d'accélérations de translations. Ces composantes sont mesurées le long de trois axes orthogonaux. Habituellement, les composantes d'accélérations en rotation sont négligées. Les accélérations enregistrées le long de ces trois composantes orthogonales sont naturellement corrélées [2].

Lorsqu'elles sont définies selon les axes principaux, les composantes du mouvement du sol ne sont pas corrélées. Ces axes principaux sont orientés de telle sorte que l'axe majeur soit

horizontal et dirigé vers l'épicentre et que l'axe mineur soit vertical. Une étude de la part de Penzien et Watabe [48] conclut que cette orientation permet d'obtenir la direction la plus critique.

2.7.1 Généralités de décorrélation stochastique des mouvements du sol en 2D et 3D

Généralement, l'orientation des composantes sismiques enregistrées est prédéterminée par l'orientation arbitraire de l'accélérographe [49].

Prenons $a_x(t)$ et $a_y(t)$, les accélérations du sol enregistrées le long des axes x et y, respectivement. Le même mouvement au sol peut être représenté par les composantes $a_{x(\theta)}(t)$ et $a_{y(\theta)}(t)$ le long d'un autre ensemble d'axes horizontaux défini par un angle θ, soit l'orientation de l'accélérographe (Voir figure 2.13). Ces composantes peuvent être calculées [48] en utilisant Eq.(2.1) :

$$\begin{bmatrix} a_{x(\theta)}(t) \\ a_{y(\theta)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

où $a_x(t)$ et $a_y(t)$ sont les accélérations horizontales enregistrées suivant les axes x et y et $a_{x(\theta)}(t)$ et $a_{y(\theta)}(t)$ sont les composantes transformées suite à une rotation d'un angle θ dans le sens antihoraire. Les composantes $a_x(t)$, $a_y(t)$, $a_{x(\theta)}(t)$ et $a_{y(\theta)}(t)$ sont naturellement corrélées. Le coefficient de corrélation [48] est défini en utilisant Eq.(2.2) :

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{(\sigma_{xx}\sigma_{yy})^{1/2}}; \sigma_{ij} = \frac{1}{t_f}\int_{t_0}^{t_f} a_i(t) \cdot a_j(t)dt \tag{2.2}$$

où σ_{xx}, σ_{yy} et σ_{xy} sont les intensités quadratiques et t_f sur la durée du séisme. Il existe un ensemble de composantes orthogonales horizontales défini par un θ_0, suivant lequel le coefficient de corrélation ρ est nul. Les axes spécifiés par cet angle représentent les directions principales des deux composantes horizontales. L'angle θ_0 est calculé [48] par Eq.(2.3) :

$$\tan 2\theta_0 = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \tag{2.3}$$

Les axes principaux d'un évènement sismique en 3D peuvent être calculés d'une manière analogue au calcul des vecteurs propres d'un problème de valeurs propres. La méthode la plus couramment utilisée pour calculer les axes principaux consiste à diagonaliser la matrice de covariance des accélérogrammes du sol. En appliquant une procédure similaire à

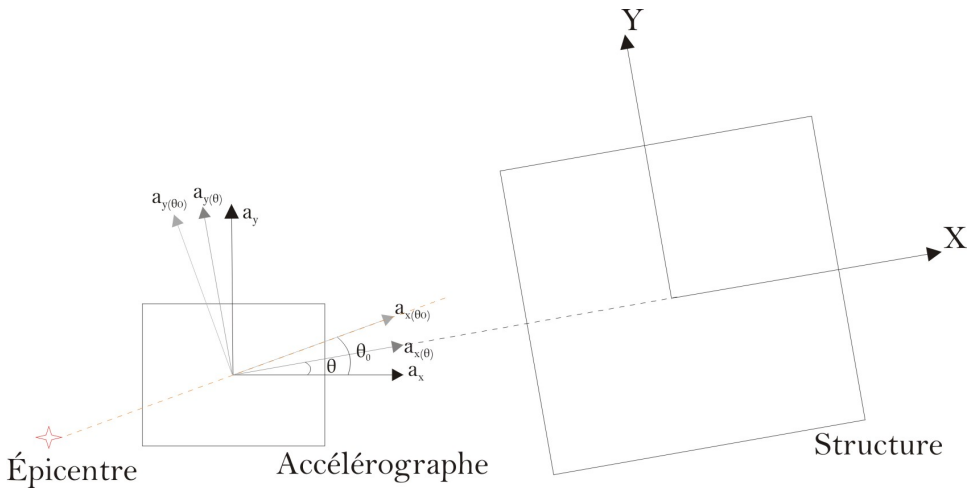

Figure 2.13 Orientation enregistrée par l'accélérographe

la transformation orthogonale des contraintes tridimensionnelles, un ensemble orthogonal d'axes principaux peut être déterminé pour les mouvements de sols tridimensionnels. Le long de ces axes principaux, les composantes des mouvements du sol ont des valeurs de variance minimale, intermédiaire et maximale et ont une valeur de covariance nulle. Une élaboration détaillée de la déccorélation stochastique des mouvements du sol en 3D est discuté dans un document interne du GRS [50]

2.7.2 Effet de décorrélation sur les secousses sismiques

Selon les études de Benjamin Blasco [51], il a été remarqué que la décorrélation des secousses sismiques a une influence remarquable sur les spectres de réponses linéaires. Pour les séismes historiques, la décorrélation a tendance de séparer les spectres des composantes horizontales verticalement. Cependant, l'effet sur les séismes simulés est minime. Il a été donc déduit que les enregistrements historiques présentent une corrélation initiale considérable. D'habitude, la composante sismique verticale est mineure. Néanmoins, si celle-ci représente une intensité importante (majeure ou intermédiaire), la décorrélation stochastique réduit fortement son spectre élastique.

2.8 Étalonnage sur des composantes sismiques bidirectionnelles

Pour une analyse parasismique efficace, il est primordial que les sismologues et les ingénieurs travaillent avec des définitions sismiques cohérentes [52]. En pratique, le rôle du sismologue est de fournir des estimations d'aléa et de risque sismique à l'ingénieur. Pour ce fait, des

modèles empiriques GMPEs sont utilisés (Ground Motion Prediction Equations). Cet aléa se traduit sous forme de mesures d'intensités sismiques (IM). Ces dernières, sont des indicateurs qui établissent une corrélation entre l'analyse du risque sismique et les paramètres de demande structurelle. Elles contiennent des informations relatives à l'accélération, à la vitesse et au déplacement des mouvements du sol. Beaucoup d'efforts ont été réalisés pour la détermination de la corrélation entre la sélection des mesures d'intensités et la réponse dynamique structurelle [53]. Hariri-Ardebili et Saouma décrivent ces indicateurs en sept catégories [54] .

Le rôle de l'ingénieur en structure est d'estimer l'effet du mouvement du sol en faisant référence à l'aléa prescrit par le sismologue.

L'accélération spectrale Sa, est la mesure d'intensité la plus couramment utilisée. Elles représente l'accélération maximale d'un oscillateur linéaire simple caractérisée par une période de vibration et un niveau d'amortissement spécifié. Cependant, cette mesure est souvent définie différemment par les sismologues et les ingénieurs en structure. En effet, la réponse sismique d'une structure quelconque est souvent évaluée sous des mesures d'accélérations spectrales provenant des secousses sismiques horizontales individuelles (Sa_{arb}). En revanche, l'élaboration d'équations empiriques (GMPEs) utilise la moyenne géométrique de deux composantes horizontales ($Sa_{g.m}$) [55]). Ces deux définitions sont valides, mais le fait de ne pas utiliser une définition commune par les deux partis concernés peut induire des erreurs dans les résultats d'analyses.

Trois définitions générales de l'accélération spectrale horizontale sont identifiées sur le rapport de NIST [56] : (1) Composante arbitraire Sa_{arb} ; (2) Moyenne Géométrique $Sa_{g.m}$ et (3) Direction maximale Sa_{maxDir}. La première est souvent utilisée pour des analyses bidimensionnelles planaires (ex ; Cadres). Elle permet d'estimer la réponse structurelle avec moins de dispersion sur la demande [55]. Cependant, aucun modèle de prédiction empirique n'est disponible pour cette définition. En d'autres termes, les modèles de prédiction empirique disponibles ne peuvent pas être utilisés sans modification. La deuxième peut également être utilisée pour des analyses bidimensionnelles, celle-ci est calculée par période en tant que racine carrée du produit de deux accélérations spectrales individuelles. En reconnaissant la dépendance de cette mesure à l'orientation des accélérographes sismiques. Boore et al [57] ont développé un paramètre de moyenne géométrique indépendant de l'orientation, noté GMRotI50. Bien qu'aucune modification ne soit requise sur les modèles de prédiction empirique, l'utilisation de cette définition introduit une dispersion supplémentaire dans la prévision de la réponse, et sera donc moins efficace en tant que IM [55]. Par ailleurs, cette définition est la plus simple à utiliser pour des analyses tri-dimensionnelles. La troisième, correspond à la plus grande accélération spectrale unidirectionnelle pour toute orientation possible d'une paire horizontale

de mouvements du sol. De la même façon, l'utilisation de cette mesure d'intensité requiert des développer un modèle de prédiction empirique dans les directions souhaités (Majeure et Mineure). Une méthodologie, basée sur la relation entre la moyenne géométrique et les accélérations spectrales principales, est proposée par Bouaanani et Bartosh [2]. Ceci en évaluant les ratios spectraux suivants à chaque période T.

$$\bar{\rho}_1 = \frac{A_{H1}(T)}{\sqrt{A_X(T)A_Y(T)}} \tag{2.4}$$

$$\bar{\rho}_2 = \frac{A_{H2}(T)}{\sqrt{A_X(T)A_Y(T)}} \tag{2.5}$$

Où :

A_{H1} : l'accélération de la composante majeure.

A_{H2} : l'accélération de la composante mineure.

A_X : l'accélération de la composante enregistrée dans la direction X.

A_Y : l'accélération de la composante enregistrée dans la direction Y.

Ces ratios permettent de mesurer la proximité, en matière d'amplitude spectrale et de contenu fréquentiel, des composantes horizontales majeures et mineures, respectivement avec la moyenne géométrique des composantes d'accélérations horizontales enregistrées. Ces ratios se sont avérés autour de 1.2 pour les composantes majeures et 0.8 pour les composantes mineures. Elles peuvent être utiles à développer des nouvelles GMPEs dans les directions principales, pour ensuite faciliter l'étalonnage des accélérations spectrales bidirectionnelles maximales.

2.9 Conclusion

Tel que présenté sur ce chapitre, trois zones sismiques sont identifiées au Canada, à savoir, le Centre et le Nord, l'Est et l'Ouest. Le contexte des deux dernières sont aussi détaillées. Ce chapitre a ensuite énoncé systématiquement un résumé de quelques méthodes de sélection et d'étalonnage des sollicitations sismiques pour fin d'analyses dynamiques temporelles. Aussi, une introduction aux notions de la décorrélation stochastique est élaborée. Enfin, une présentation sur les différentes approches d'étalonnages sur des composantes sismiques bidirectionnelles est effectuée. Les éléments présentés dans ce chapitre sont complémentaires aux chapitres 3 et 4 qui suivent.

CHAPITRE 3 OUTIL INTERACTIF POUR ÉTALONNAGE DES SÉISMES

3.1 Introduction

Ce chapitre décrit l'outil interactif propre à l'étalonnage des secousses sismiques. Le présent projet a pour objectif de créer un outil de calcul électronique pouvant être utilisé pour fin d'analyses dynamiques de différents systèmes structuraux importants. Cet outil respecte les différentes exigences mises dans 6 méthodes d'étalonnages variées. Notamment, la méthode proposée par le Code National du Bâtiment 2015 (CNB2015), la méthode proposée par l'American Society of Civil Engineers 2016 (ASCE/SEI 7-10), La méthode proposé par PEER 2010 (MSE), l'étalonnage au PGA, l'étalonnage à $Sa(T_1)$ et l'étalonnage au T_2-$1.2T_1$.

La boîte à outils a été entièrement développée dans un environnement de programmation MATLAB® [5]. Grâce à l'utilisation d'une interface conviviale, le programme reçoit des informations d'entrée sur le type d'analyse, la méthode d'étalonnage, le spectre cible, les périodes de vibrations de la structure en question, le nombre d'accélérogrammes requis et la base des données . La boîte à outils génères ensuite une liste d'accélérogrammes étalonnés en format compatible avec la plupart des programmes d'analyses structurelles. Tout cela, en respectant les exigences fixées comme entrée.

L'outil est conçu pour permettre aux ingénieurs en exercice de générer facilement des accélérogrammes conformes au code de conception. Il peut être également utile pour la recherche ou l'apprentissage. Ses différentes fonctionnalités peuvent aider à étudier l'effet de différentes exigences de compatibilité entre le spectre cible et le spectre de réponse sur une structure en génie civil. La boîte à outils sera mise à la disposition de tous sans frais d'utilisation.

Pour ce chapitre, il est a noter que le cas 1 correspond à l'étalonnage sur des composantes d'accélérations horizontales uniques, alors que le cas 2 indique l'étalonnage sur la moyenne géométrique de deux composantes d'accélérations horizontales qui proviennent de la même station.

3.2 Méthodes de calculs intégrées par défaut dans le programme

Les différentes méthodes d'étalonnages intégrées dans le calcul sont présentées.

3.2.1 Méthode du CNB2015

Les étapes de calcul pour cette méthode sont détaillées ci-dessous. Un organigramme résumant cette approche peut être consulté sur la figure A.1 de l'Annexe A.

Étape 1 : Calcul de la période cible T_r.

cas 1 :

$$T_{min} = min[0.15T_1, T_{90\%}] \text{ et } T_{max} = max[2.0T_1, 1.5]$$

Où :

T_1 : Période de vibration fondamentale dans la direction d'étude.

$T_{90\%}$:Période du mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée.

cas 2 :

$$T_{min} = min[0.15T_{court}, T_{90\%|1}, T_{90\%|2}] \text{ et } T_{max} = max[2.0T_{long}, 1.5]$$

Où :

T_{court} : Période de vibration fondamentale minimale dans les deux directions horizontales.

T_{long} : Période de vibration fondamentale maximale dans les deux directions horizontales.

$T_{90\%|1}$: Mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée dans la direction horizontale première.

$T_{90\%|2}$: Mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée dans la direction horizontale seconde.

Étape 2 : Calcul du facteur d'étalonnage préliminaire f.

cas 1 :

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{N} k_i}{N} \text{ avec } k_i = \frac{S(T_i)}{S_r(T_i)}$$

cas 2 :

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{N} k_i}{N} \text{ avec } k_i = \frac{S(T_i)}{S_{GM}(T_i)} \text{ ; } S_{GM}(T_i) = \sqrt{S_{ENR}(T_i) \times S_{ENT}(T_i)}$$

f : Facteur d'étalonnage.

k : Rapport entre le spectre cible et le spectre de réponse pour tout point i bornée par T_{min} et T_{max}.

S(T) : Spectre de cible définis.

S_r(T) : Spectre de réponse pour une composante horizontale unique.

S_{ENR}(T) : Spectre de réponse sur la direction horizontale radiale.

S_{ENT}(T) : Spectre de réponse sur la direction horizontale transversale.

S_{GM}(T) : Spectre de réponse moyen de deux composantes horizontales enregistrées sur la même station.

Étape 3 : Calcul du Spectre de réponse d'accélération étalonnée S_s(T).

cas 1 :

$$S_s(T_i) = f \times S_r(T_i)$$

cas 2

$$S_s(T_i) = f \times S_{GM}(T_i)$$

Étape 4 : Calcul de l'écart type σ.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(k_i - f)^2}$$

Étape 5 : Répéter les étapes 2 à 4 pour toute la liste d'accélérogrammes se trouvant sur la base de données.

Étape 6 : Éliminer tout accélérogramme ayant un facteur d'étalonnage $f > 4.0$ ou $f < 0.5$. Dans le cas ou la base de donnée est restreinte il est possible d'allonger ces limites.

Étape 7 : Sélectionner les spectres de réponses ayant les 11 premiers écart-types (au minimum) les plus petits. Pour le cas 2, il est raisonnable de sélectionner les 22 premiers (11 couples).

Étape 8 : Calcul du spectre de réponses moyen S_g(T).

$$S_g(T) = \frac{\sum_{n=1}^{11} S_{s,n}(T_i)}{11}$$

n : pour le cas 1, n est l'indice du spectre de réponse unique. Pour le cas 2, ce paramètre est l'indice de la moyenne géométrique de deux spectre de réponses.

Étape 9 : calcul du pourcentage d'erreur entre S_g(T) et S(T) entre T_{min} et T_{max}.

$$\%Error_i = \frac{|S_g(T_i) - S(T_i)|}{S(T_i)} \times 100$$

Pour tout point i entre T_{min} et T_{max} : Si $\%Error_i > 10\%$, un deuxième facteur d'étalonnage est requis (voir Étape 10). Sinon utiliser les facteurs f calculés à l'étape 2 pour étalonner les accélérogrammes sélectionnés. Pour le cas 2, puisqu'un seul facteur est calculé par moyenne géométrique, le même est utilisé pour étalonner les deux composantes qui forment cette moyenne.

Étape 10 : Calcul du facteur d'étalonnage secondaire.

- Trouver l'index j ou le pourcentage d'erreur est maximale entre la plage T_{min} et T_{max}
- calculer le facteur de correction $\lambda = 0.9 \times \frac{S(T_j)}{S_g(T_j)}$
- utiliser le facteur $\bar{f}_n = f_n \times \lambda$ pour étalonner chaque accélérogramme avec n=1,2,3...11

Pour La méthode B définie sur la section 2.1.2.b du commentaire J. Ce processus de calcul est fait pour chaque scénario étudié.

3.2.2 Méthode du ASCE/SEI 7-10

Les étapes de calculs pour cette méthode sont détaillées ci-dessous. Un organigramme résumant cette approche peut être consulté sur la figure A.2 de l'Annexe A.

Étape 1 : Calcul de la période cible T_r.

cas 1 :

$$T_{min} = min[0.2T_1, T_{90\%}] \text{ et } T_{max} = 2.0T_1$$

Où :

T_1 : Période de vibration fondamentale dans la direction d'étude.

$T_{90\%}$: Mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée.

cas 2 :

$$T_{min} = min[0.2T_{long}, T_{90\%|1}, T_{90\%|2}] \text{ et } T_{max} = 2.0T_{long}$$

Où :

T_{long} : Période de vibration fondamentale maximale dans les deux directions de translations et de torsions

$T_{90\%|1}$: Mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée dans la direction horizontale première.

$T_{90\%|2}$: Mode de vibration dont 90% de la masse modale est représentée dans la direction horizontale seconde.

Étape 2 : Calcul du facteur d'étalonnage préliminaire f.

<u>cas 1</u> :

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{N} k_i}{N} \text{ avec } k_i = \frac{S(T_i)}{S_r(T_i)}$$

<u>cas 2</u> :

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{N} k_i}{N} \text{ avec } k_i = \frac{S(T_i)}{S_{GM}(T_i)} \text{ ; } S_{GM}(T_i) = \sqrt{S_{ENR}(T_i) \times S_{ENT}(T_i)}$$

f : Facteur d'étalonnage.

k : Rapport entre le spectre cible et le spectre de réponse pour tout point i bornée par T_{min} et T_{max}.

S(T) : Spectre de cible définis.

$S_r(T)$: Spectre de réponse pour une composante horizontale unique.

$S_{ENR}(T)$: Spectre de réponse sur la direction horizontale radiale.

$S_{ENT}(T)$: Spectre de réponse sur la direction horizontale transversale.

$S_{GM}(T)$: Spectre de réponse moyen de deux composantes horizontales enregistrées sur la même station.

Étape 3 : Calcul du Spectre de réponse d'accélération étalonnée $S_s(T)$.

<u>cas 1</u> :

$$S_s(T_i) = f \times S_r(T_i)$$

<u>cas 2</u>

$$S_s(T_i) = f \times S_{GM}(T_i)$$

Étape 4 : Calcul de la somme des carrés SSE.

$$SSE = \sum_1^n log(S(T_i) - S_s(T_i))^2$$

Étape 5 : Répéter les étapes 2 à 4 pour toute la liste d'accélérogrammes se trouvant sur la base de données.

Étape 6 : Éliminer tout accélérogramme ayant un facteur d'étalonnage $f > 4.0$ ou $f < 0.25$. Dans le cas ou la base de donnée est restreinte il est possible d'allonger ces limites.

Étape 7 : Sélectionner les spectres de réponses ayant les 11 premiers SSE (au minimum) les plus petits. Pour le cas 2, il est raisonnable de sélectionneer les 22 premiers (11 couples).

Étape 8 : Calcul du spectre de réponses moyen $S_g(T)$.

$$S_g(T) = \frac{\sum_{n=1}^{11} S_{s,n}(T_i)}{11}$$

n : pour le cas 1, n est l'indice du spectre de réponse unique. Pour le cas 2, ce paramètre est l'indice de la moyenne géométrique de deux spectre de réponses.

Étape 9 : calcul du pourcentage d'erreur entre $S_g(T)$ et $S(T)$ entre T_{min} et T_{max}.

$$\%Error_i = \frac{|S_g(T_i) - S(T_i)|}{S(T_i)} \times 100$$

Pour tout point i entre T_{min} et T_{max} : Si $\%Error_i > 10\%$, un deuxième facteur d'étalonnage est requis (voir Étape 10). Sinon utiliser les facteurs f calculés à l'étape 2 pour étalonner les accélérogrammes sélectionnés. Pour le cas 2, puisqu'un seul facteur est calculé par moyenne géométrique, les même est utilisé pour étalonner les deux composantes qui forment cette moyenne.

Étape 10 : Calcul du facteur d'étalonnage secondaire.

- Trouver l'index j ou le pourcentage d'erreur est maximale entre la plage T_{min} et T_{max}
- calculer le facteur de correction $\lambda = 0.9 \times \frac{S(T_j)}{S_g(T_j)}$
- utiliser le facteur $\bar{f}_n = f_n \times \lambda$ pour étalonner chaque accélérogramme avec n=1,2,3...11

3.2.3 Méthode MSE

Les étapes de cette méthode sont détaillées ci-dessous. Un organigramme résumant cette approche peut être consulté sur la figure A.3 de l'Annexe A.

Étape 1 : Choix de la période cible T_r.

Selon son jugement l'ingénieur doit choisir une plage de période cible T_r qui modélise le comportement de sa structure. Ceci s'applique pour les deux cas d'analyses.

Étape 2 : Calcul du facteur d'étalonnage f.

cas 1 :

$$lnf = \frac{\sum_i w(T_i) ln\left[\frac{S(T_i)}{S_r(T_i)}\right])}{\sum_i w(T_i)}$$

<u>cas 2</u> :

$$lnf = \frac{\sum_i w(T_i) ln\left[\frac{S(T_i)}{S_{GM}(T_i)}\right])}{\sum_i w(T_i)} \; ; \; S_{GM}(T_i) = \sqrt{S_{ENR}(T_i) \times S_{ENT}(T_i)}$$

w(T) : paramètre qui permet d'attribuer une pondération à différentes parties de la plage cible. Dans l'outil, ce paramètre est choisi comme étant unitaire par défaut.

S(T) : Spectre de cible définis.

S_r(T) : Spectre de réponse pour une composante horizontale unique.

S_{ENR}(T) : Spectre de réponse sur la direction horizontale radiale.

S_{ENT}(T) : Spectre de réponse sur la direction horizontale transversale.

S_{GM}(T) : Spectre de réponse moyen de deux composantes horizontales enregistrées sur la même station.

Étape 3 : : Calcul de l'erreur quadratique moyenne MSE.

<u>cas 1</u> :

$$MSE = \frac{\sum_i w(T_i)\{ln[S(T_i)] - ln[f \times S_r(T_i)]\}^2}{\sum_i w(T_i)}$$

<u>cas 2</u> :

$$MSE = \frac{\sum_i w(T_i)\{ln[S(T_i)] - ln[f \times S_{GM}(T_i)]\}^2}{\sum_i w(T_i)} \; ; \; S_{GM}(T_i) = \sqrt{S_{ENR}(T_i) \times S_{ENT}(T_i)}$$

Étape 4 : refaire les étapes 2 et 3 pour chaque accélérogramme se trouvant sur la base des données.

Étape 5 : Sélectionner un nombre n de spectres de réponses ayant des erreurs quadratiques moyennes minimes.

Étape 5 : Multiplier les accélérogrammes des spectres choisis par les facteurs d'étalonnage f correspondant. Pour le <u>cas 2</u>, puisqu'un seul facteur est calculé par moyenne géométrique, les même est utilisé pour étalonner les deux composantes qui forment cette moyenne.

3.2.4 Méthode PGA

Les étapes de calcul pour cette méthode sont détaillés ci-dessous. Un organigramme résumant cette approche peut être consulté sur la figure A.4 de l'Annexe A.

Étape 1 : Calcul du facteur d'étalonnage f.

cas 1 :

$$\text{f}= \frac{PGA_T}{PGA_r}$$

cas 2 :

$$\text{f}= \frac{PGA_T}{PGA_{GM}} \text{ ; } PGA_{GM}(T_i) = \sqrt{PGA_{ENR} \times PGA_{ENT}}$$

PGA_T : Accélération maximale cible du sol.

PGA_r : Accélération maximale enregistrée du sol.

PGA_ENR : Accélération maximale enregistrée du sol sur la direction horizontale radiale.

PGA_ENT : Accélération maximale enregistrée du sol sur la direction horizontale transversale.

PGA_GM : Accélération maximale moyenne de deux composantes horizontales enregistrées sur la même station.

Étape 2 : Refaire l'étape 1 pour chaque accélérogramme de la base de donnée.

Étape 3 : : Multiplier chaque accélérogramme par le facteur d'étalonnage f correspondant. Pour le cas 2, puisqu'un seul facteur est calculé par moyenne géométrique, les même est utilisé pour étalonner les deux composantes qui forment cette moyenne.

Étape 4 : Les accélérogrammes étalonnés peuvent être choisis de façon aléatoire pour les analyses. Dans ce projet, l'outil remet à l'utilisateur un nombre n d'accélérogrammes définis sans post-sélection.

3.2.5 Méthode $\mathbf{S(T_1)}$

Les étapes de calcul pour cette méthode sont détaillés ci-dessous. Un organigramme résumant cette approche peut être consulté sur la figure A.5 de l'Annexe A.

Étape 1 : Calcul de la période fondamentale de la structure T_1.

Selon le choix du cas d'analyse, l'ingénieur doit fournir une période fondamentale T.

Étape 2 : Calcul du facteur d'étalonnage f.

cas 1 :

$$f = \frac{S(T_1)}{S_r(T_1)}$$

<u>cas 2 :</u>

$$f = \frac{S(T_1)}{S_{GM}(T_1)} \; ; \; S_{GM}(T_i) = \sqrt{S_{ENR}(T_i) \times S_{ENT}(T_i)}$$

T_1 : Période de vibration fondamentale dans la direction d'étude.

S(T) : Spectre de cible définis.

$S_r(T)$: Spectre de réponse pour une composante horizontale unique.

$S_{ENR}(T)$: Spectre de réponse sur la direction horizontale radiale.

$S_{ENT}(T)$: Spectre de réponse sur la direction horizontale transversale.

$S_{GM}(T)$: Spectre de réponse moyen de deux composantes horizontales enregistrées sur la même station.

Étape 4 : : Multiplier chaque accélérogramme par le facteur d'étalonnage f correspondant. Pour le <u>cas 2</u>, puisqu'un seul facteur est calculé par moyenne géométrique, les même est utilisé pour étalonner les deux composantes qui forment cette moyenne.

Étape 5 : Les accélérogrammes étalonnés peuvent être choisies de façon aléatoire pour les analyses. Dans ce projet, l'outil remet à l'utilisateur un nombre n d'accélérogrammes définis sans post-sélection.

3.2.6 Méthode T_2-1.2T_1 (Partial Spectral Area)

Les étapes de calculs pour cette méthode sont détaillées ci-dessous. Un organigramme résumant cette approche peut être consulté sur la figure A.6 de l'Annexe A.

Étape 1 : Calcul de la période cible T_r.

<u>cas 1</u> :

$$T_{min} = T_2 \text{ et } T_{max} = 1.2T_1$$

Où :

T_2 : Période du deuxième mode de vibration dans la direction d'étude.

T_1 : Période de vibration fondamentale dans la direction d'étude.

<u>cas 2</u> :

Selon son jugement l'ingénieur doit choisir une plage de période cible T_r qui modélise le comportement de la structure en 3D.

Étape 2 : Calcul du facteur d'étalonnage f.

cas 1 :

$$f = \frac{\int_{T_2}^{1.2T_1} S(T)dt}{\int_{T_2}^{1.2T_1} S_r(T)dt}$$

cas 2 :

$$f = \frac{\int_{T_2}^{1.2T_1} S(T)dt}{\int_{T_2}^{1.2T_1} S_{GM}(T)dt} \; ; \; S_{GM}(T_i) = \sqrt{S_{ENR}(T_i) \times S_{ENT}(T_i)}$$

S(T) : Spectre de cible définis.

$S_r(T)$: Spectre de réponse pour une composante horizontale unique.

$S_{ENR}(T)$: Spectre de réponse sur la direction horizontale radiale.

$S_{ENT}(T)$: Spectre de réponse sur la direction horizontale transversale.

$S_{GM}(T)$: Spectre de réponse moyen de deux composantes horizontales enregistrées sur la même station.

Étape 3 : Refaire l'étape 2 pour chaque accélérogramme de la base de donnée.

Étape 4 : : Multiplier chaque accélérogramme par le facteur d'étalonnage f correspondant.Pour le cas 2, puisqu'un seul facteur est calculé par moyenne géométrique, les même est utilisé pour étalonner les deux composantes qui forment cette moyenne.

Étape 5 : Les accélérogrammes étalonnés peuvent être choisies de façon aléatoire pour les analyses. Dans ce projet, l'outil remet à l'utilisateur un nombre n d'accélérogrammes définis sans post-sélection.

3.3 Caractéristiques et fonctionnalités de l'outil

3.3.1 Langage de programmation

La boîte à outils a été entièrement développée à l'aide de MATLAB R2017a (Math Works 2017). Cet outil est conçu de façon interactive, il permet à l'utilisateur d'introduire des informations d'entrée sur les secousses de vibrations originales ainsi que sur le spectre cible de conception. L'interface graphique de l'outil a été développée à l'aide de MATLAB App Designer, un environnement de conception disponible dans MATLAB. Ce dernier simplifie le

processus de présentation des différentes composantes visuelles d'une interface d'utilisation. Celle-ci est développée en utilisant une librairie de composantes qui comprend une liste d'outils standards, à savoir, un ensemble de boutons, jauges, lampes et interrupteurs permettant de créer des menus de commandes et des interactions homme-machines.

La création de l'application a consisté à deux tâches principales, soit, l'organisation des composantes visuelles de l'interface d'utilisation et la programmation de son comportement. Pour ce projet, le programme a été développé sur un canevas intégré appelé MATLAB Editor. Ce dernier permet d'ajouter des nouvelles propriétés, des rappels et des fonctions en un seul clic. App Designer génère un code par programmation par objet, un format qui facilite le partage des données entre les différentes parties de l'application. Les fichiers de codes créés pour ce projet sont uniques et ensuite regroupés par compilations.

Le code d'App Designer utilise une structure de MATLAB, facile à lire. Les propriétés de l'application apparaissent en premier, suivies des fonctions définies par l'utilisateur, ensuite le code utilisé pour l'initialisation de l'application et ses différentes composantes. Les informations d'entrées fournies par l'utilisateur sont stockées sous forme de variables, principalement sous la forme d'une structure de données appelée "*Callback Function Input Arguments*". Cette structure est introduit de la façon suivante :

— **app** : Pour accéder aux objets du *UI* (Interface d'utilisation) ainsi qu'à d'autres variables stockées en tant que propriétés.
— **Event** : Objet contenant les informations spécifiques fournies par l'utilisateur.

Toute composante peut être facilement accessible en utilisant la syntaxe *app.Component.Property*. Par exemple la commande suivante est utilisée pour lire la vibration fondamentale de la structure fournis par l'utilisateur app.VibrationPeriod.Value=0.89.

L'environnement de conception MATLAB App Designer, permet à l'utilisateur de procurer la boîte à outils sans nécessiter une installation complète de MATLAB. Le package d'installation est également fourni avec un ensemble de documentations pertinentes qui expliquent le processus de l'exécution de l'outil et son contexte théorique.

L'outil simplifie grandement toute procédure d'étalonnage en fournissant une interface d'utilisation graphique grâce à laquelle l'utilisateur peut désormais générer et enregistrer des spectres de réponses et accélérogrammes étalonnées. D'ailleurs, le calcul des spectres est effectué en utilisant un utilitaire développé par Professeur Najib Bouaanani [58]. Aussi, certaines fonctionnalités mises en place sont utiles à l'ingénieur pour faciliter son jugement sur l'authenticité du groupe d'accélérogrammes étalonnés qu'il pourrait utiliser pour ses analyses.

3.3.2 Algorithme implémenté dans l'outil de calcul

L'algorithme implémenté dans l'outil de calcul est subdivisé en trois grandes phases :

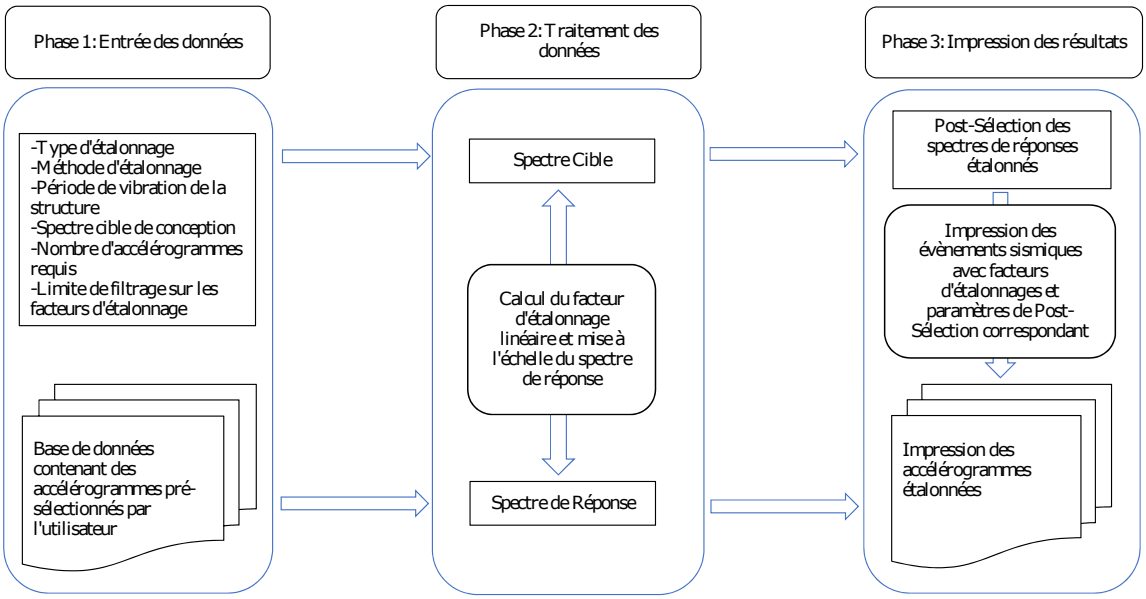

Figure 3.1 Algorithme Général de l'outil de calcul

Phase 1-Entrée des données : En utilisant le menu disponible sur l'interface graphique, l'utilisateur doit introduire les informations qui suivent. Notamment, le type et la méthode d'étalonnage, les périodes de vibrations de la structure, le spectre cible de conception, le nombre d'accélérogrammes requis, la limite de filtrage sur les facteurs d'étalonnage et la base de données sélectionnée.

Phase 2-Traitement des données : Selon les directives de la méthode d'étalonnage sélectionnée décrite sur la section 3.2, chaque fichier dans la base de données est traité de façon unique. Au premier abord, tout fichier d'accélérogramme lu est ensuite converti en spectre de réponse. Subséquemment, ce dernier est mis en échelle par le biais d'un scalaire linéaire

de sorte qu'il soit compatible avec le spectre de conception.

Phase 3-Impression des résultats : Des paramètres d'optimisations sont utilisés pour post-sélection d'un ensemble d'accélérogrammes étalonné. Ce dernier concordant le mieux au spectre cible, est imprimé. Les paramètres d'optimisation et d'étalonnage correspondants sont pareillement imprimés et affichés sur l'interface graphique.

Les étapes de la phase 1, sont décrit plus en détail sur la figure 3.2. Pour cette phase, l'algorithme utilisé par l'outil de calcul est optimisé de façon à prévenir les erreurs tout en étant interactif. En effet, Dans le but de guider l'utilisateur dans ses analyses, l'outil de calcul réagit à fur et à mesure que ce dernier introduit ses données. La première étape consiste à sélectionner le menu d'étalonnage par lequel l'utilisateur est intéressé. Soit, les onglets "Eastern Canada" ou "Western Canada". Le premier inclut les 6 méthodes en total. Dans ce menu, l'étalonnage du spectre de réponse est fait sur un seul spectre cible autour d'un intervalle de période concernée. Le deuxième est plus axé sur l'étalonnage d'un ensemble d'accélérogrammes pour une structure sujette à des charges sismiques qui proviennent de différentes sources tectoniques. Ce qui est le cas en général, pour certaines zones dans l'ouest du Canada. L'utilisateur de l'outil de calcul doit ensuite sélectionner le type d'étalonnage. Pour cela, deux cas ont été intégrés. À savoir, l'étalonnage sur des composantes sismiques unidirectionnelles, pour un modèle numérique 2D ou l'étalonnage sur des composantes sismiques bidirectionnelles, pour un modèle numérique 3D. Ultérieurement, après avoir sélectionné la méthode de l'étalonnage désirée, l'usager doit définir les périodes de vibrations de la structure. Ainsi, elles vont servir à calculer la plage de période d'intérêt selon la méthode de calcul choisie. Il est aussi permis de travailler avec une plage de période qui diffère de celle recommandé par la méthode de calcul. En cas d'erreur ou du non besoin de cette définition, l'outil de calcul renvois un message à l'utilisateur comme moyen d'avertissement. Une autre étape consiste à définir le spectre de conception cible concerné, cette option a été ajoutée de façon qu'elle soit strictement définie par l'utilisateur. Ce dernier peut aussi choisir le nombre d'accélérogrammes qui l'intéresse pour son analyse. Par défaut, ce nombre est limité à 11 accélérogrammes, comme proposé par le code national du bâtiment [21]. Une base de données complète doit aussi être fournie dans un format qui concorde avec le type d'analyse. Dans le cas ou son contenu est insuffisant, l'outil de calcul va renvoyer un message d'erreur pour prévenir l'utilisateur. Finalement, ce dernier peut lancer le programme pour afficher et imprimer ses résultats.

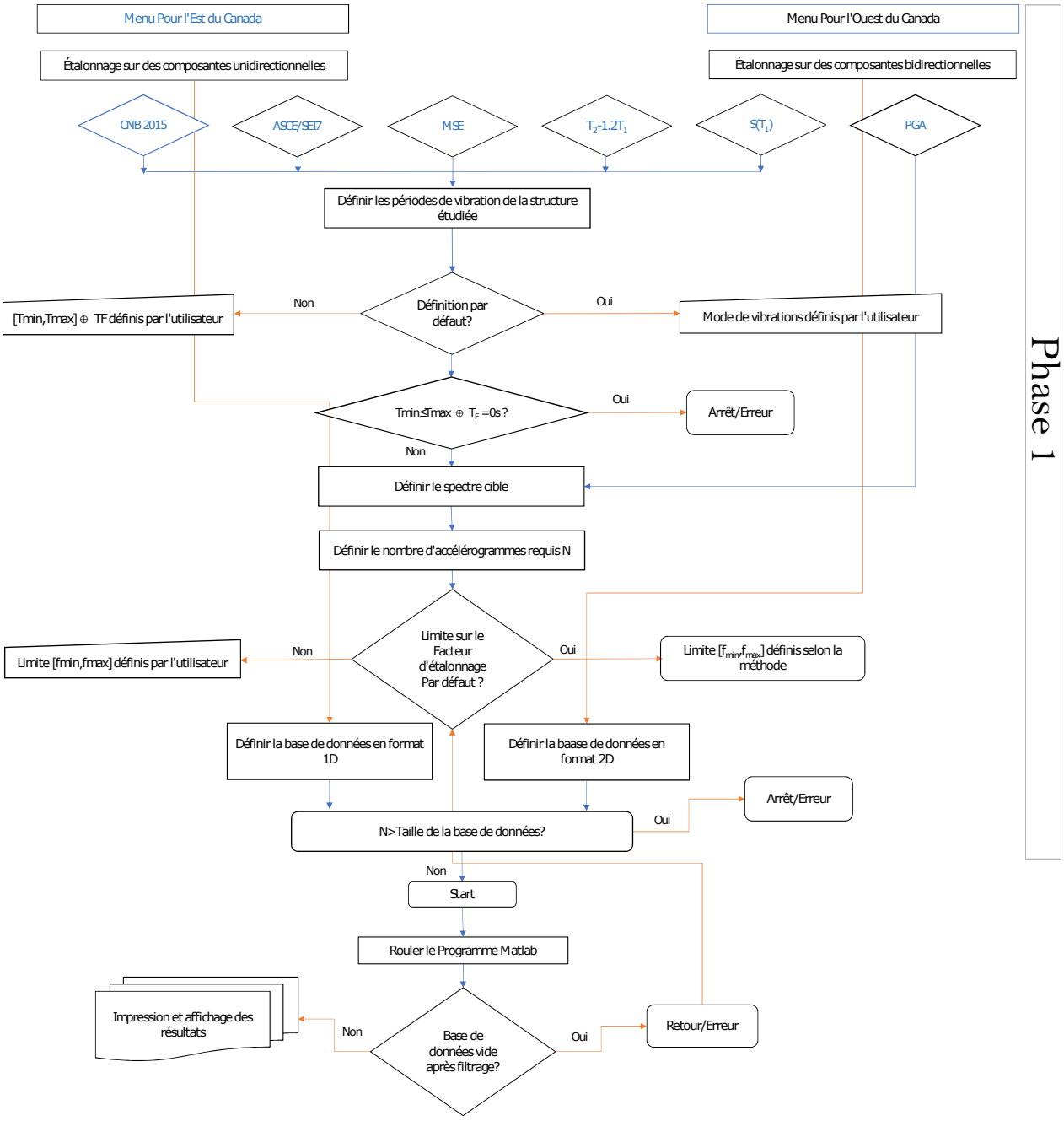

Figure 3.2 Algorithme détaillé de la phase 1

3.3.3 Fonctionnalités de l'interface graphique de l'outil de calcul

Comme indiqué précédemment, la boite à outils vise principalement à générer des accélérogrammes compatibles avec le spectre de conception cible. Pour rester simple et interactif, l'interface d'utilisation assemble plusieurs panneaux auto-explicatifs et mutuellement indépendants. Ces panneaux guident l'utilisateur à travers les différentes étapes du processus d'étalonnage des secousses sismiques. En résumé, l'interface graphique est composée de quatre panneaux, un premier pour choisir le type d'étalonnage, un deuxième pour choisir la méthode d'étalonnage ainsi que pour introduire les différentes données nécessaires à la réalisation de cette dernière, un troisième pour chargement de la base des données et finalement un quatrième pour lancer les analyses et générer des accélérogrammes étalonnés. Les résultats sont aussi affichés sur un tableau récapitulatif et les spectres de réponses étalonnés sont tracés sur des figures. Les sections qui suivent décrivent les éléments de l'interface graphique de l'outil en détail.

Description du menu d'étalonnage pour l'Est du Canada

Les composantes de l'interface d'utilisation de l'onglet "Eastern canada" sont présentés sur la figure 3.3. Les boutons affichés sur cette figure, sont utilisés pour différencier entre les différentes fonctionnalités sur le texte accompagné.

1-Type of Scaling :

L'utilisateur a le choix entre les options ; "Single Component" ou "Multi Component". D'une part, la première option est pour l'étalonnage sur une composante sismique unique. D'autre part, la deuxième option devrait être sélectionnée pour l'étalonnage sur la moyenne géométrique de deux composantes sismiques. Préférablement, ces dernières doivent provenir de la même station d'enregistrement d'un séisme.

2-Scaling Method :

Le menu déroulant présenté sur la figure 3.4 donne à l'utilisateur le choix entre 6 méthodes d'étalonnages. Celles-ci, sont décrites précédemment sur les sections 2.4.2 et 3.2. Au total, les méthodes ont été surnommés comme ceci ; NBCC 2015, MSE, Partial Spectral Area (T_2-$1.2T_1$), ASCE/SEI 7, $S(T_1)$ et PGA.

3-Define Vibration Periods :

Dépendamment de la méthode d'étalonnage sélectionnée, une fenêtre surgit en demandant à l'utilisateur d'introduire les différents modes de vibrations structurelles. Celles-ci sont nécessaires pour le calcul de la plage de période d'intérêt. Les équations de calculs de cette dernière

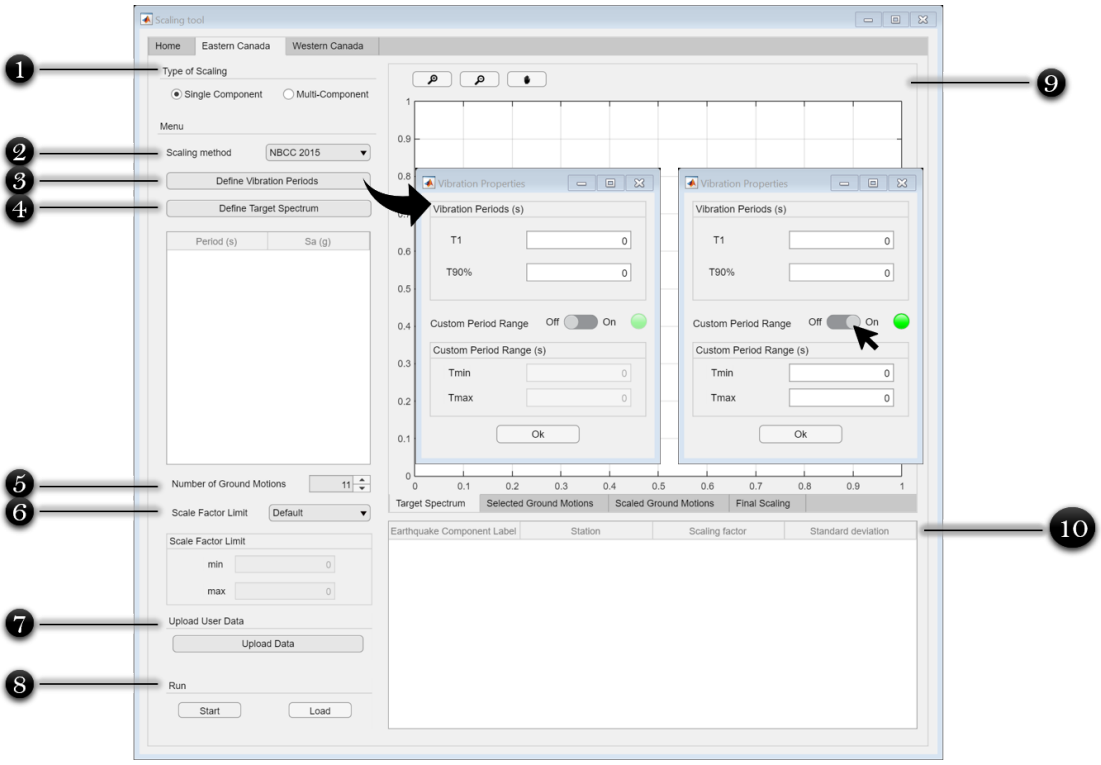

Figure 3.3 Interface graphique principale de l'onglet Eastern Canada

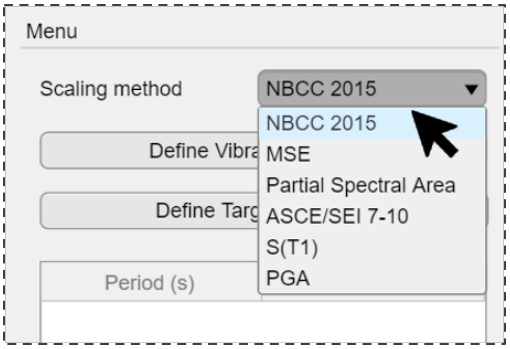

Figure 3.4 Menu déroulant des différentes méthodes d'étalonnage intégrées dans l'outil de calcul

sont recommandées par chaque méthode d'étalonnage. Ainsi, elles sont intégrées par défaut via un code. Néanmoins, l'utilisateur a la possibilité d'ignorer ces recommandations et d'introduire une période cible de son choix. Ceci, tout simplement en activant le "Custom Period range Switch". Il est a noté que cette fonction est programmée seulement pour les méthodes, NBCC 2015, MSE, T_2-1.2T_1 et ASCE/SEI 7. Par ailleurs, une seule période fondamentale est demandée pour la méthode S(T_1). Aussi, Puisque la méthode PGA est indépendante des modes de vibrations de la structure, aucune définition de la part de l'utilisateur n'est requise.

Comme montré sur la figure 3.5, notons le cas 1 pour un étalonnage sur des composantes unidirectionnelles et les cas 2 pour un étalonnage sur des composantes bidirectionnelles.

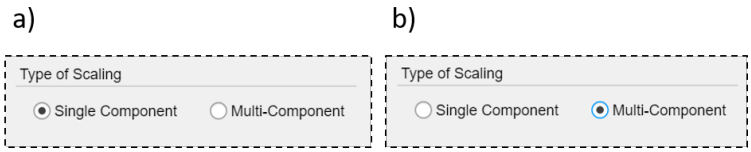

Figure 3.5 Panneau pour la sélection du type d'étalonnage ; a) cas 1 : Pour l'étalonnage sur des composantes sismiques unidirectionnelles ; b) cas 2 : Pour l'étalonnage sur des composantes sismiques bidirectionnelles

Les sections qui suivent décrivent les différentes fenêtres qui apparaissent en fonction du type et de la méthode d'étalonnage sélectionnés par l'utilisateur.

-Interface d'utilisation pour la méthode NBCC 2015 : Comme il est possible de voir sur la figures 3.6.a et 3.6.b, pour le cas 1 l'utilisateur doit introduire le modes de vibrations fondamentale T_1 et supérieure T90%. L'utilisateur peut aussi introduire une période cible de son choix. Ce dernier peut être adopté en activant le switch "Custom Period range" sur On. Ensuite les bornes inférieure et supérieure de la période cible sont définies (T_{min}, T_{max}). De manière analogue, ce principe s'applique pour le cas 2 (voir les figures 3.6.c et 3.6.d). Néanmoins, pour le calcul de la période cible par défaut, les modes de vibrations sont demandés sur les deux directions d'analyses. Notamment, les périodes fondamentales et supérieures dans les directions d'analyses 1 et 2 de la structure.

-Interface d'utilisation pour la méthode ASCE/SEI 7 : Comme expliqué précédemment, les fenêtres d'affichages sur la figure 3.7 suivent la même logique de la méthode NBCC 2015. Selon le cas d'étalonnage, l'utilisateur a le choix entre le calcul de la période cible par défaut ou par définition personnalisée. Pour cette méthode, le calcul par défaut requiert les périodes fondamentales de vibrations de translations (T1|DIR1, T90|DIR1, T1|DIR2, T90|DIR2) dans les deux directions d'analyses, et de torsion (T1|Torsion)

-Interface d'utilisation pour la méthode MSE : Pour cette méthode, la même fenêtre surgit

pour les deux cas d'étalonnages. Au premier abord, l'utilisateur doit définir une période cible bornée par T_{min} et T_{max}. Ensuite, En cliquant sur le bouton "1. Print Period Range Vector", un vecteur de période T est créé avec un pas de temps fixe. Il devrait ensuite être utilisé pour produire un vecteur poids w(T). Ce dernier, permet d'attribuer une pondération à différentes parties de la période cible. Il doit être en format *.txt et peut être charger en cliquant sur le bouton "2.Load Weight Vector". Un graphique est tracé pour afficher la variation du vecteur poids w(T). L'interface d'utilisation de cette méthode est présentée sur la figure 3.8.

-Interface d'utilisation pour la méthode PGA : Puisque cette méthode ne requiert aucune information sur la période de vibration de la structure, une note surgit pour avertir l'utilisateur (voir figure 3.9).

-Interface d'utilisation pour la méthode $S(T_1)$: Pour les 2 cas d'étalonnages, il suffit d'insérer une période de vibration autour de laquelle l'utilisateur veut apparier le spectre cible et de réponse (voir figure 3.10).

-Interface d'utilisation pour la méthode T_2-1.2T_1 : Pour le cas 1, cette méthode suit le même principe que les deux premières. Soit, NBCC2015 et ASCE/SEI 7. Le calcul de la période cible par défaut requiert les deux premiers modes de vibration de la structure (T1 et T2). Par ailleurs, le cas 2 oblige l'utilisateur à introduire une période cible de son choix (voir figure 3.11).

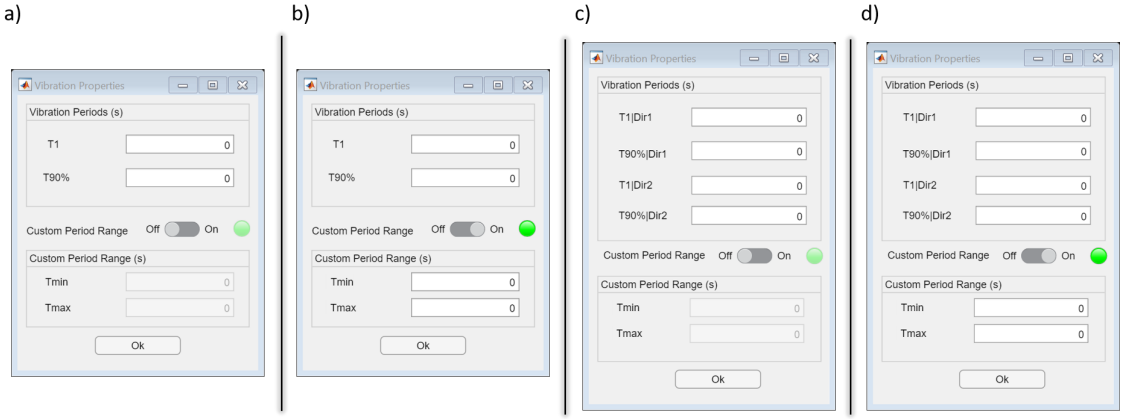

Figure 3.6 Fenêtres pour définir les périodes de vibrations pour la méthode CNB 2015 ; a) cas 1 : Définition par défaut ; b) cas1 : Définition personnalisée ; c) cas 2 : Définition par défaut ; d) cas 2 : Définition personnalisée

4-Define Target Spectrum :

L'utilisateur doit définir un spectre cible via un fichier d'entrée de données. Ce fichier devrait être en format *.txt. Il peut être crée et modifié à l'aide de n'importe quel éditeur de texte

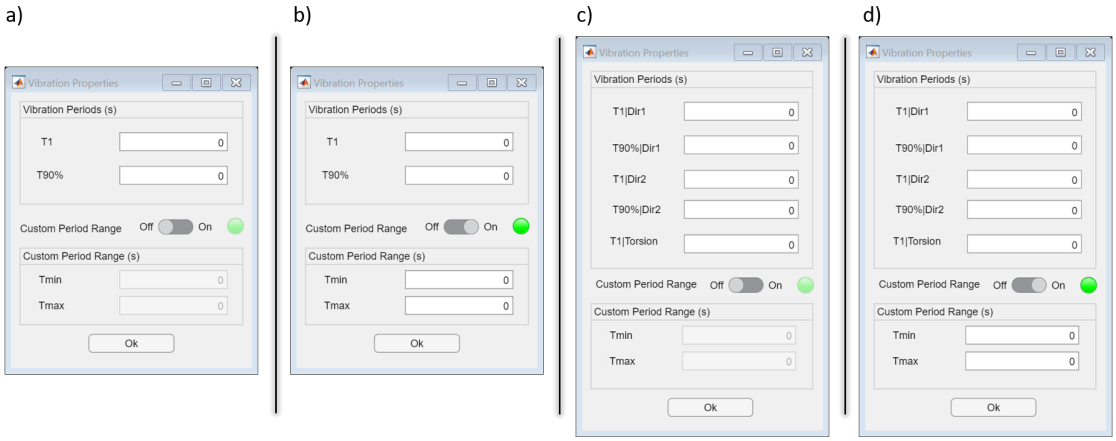

Figure 3.7 Fenêtres pour définir les modes de vibrations pour la méthode ASCE/SEI 7 ; a) a) cas 1 : Définition par défaut ; b) cas1 : Définition personnalisée ; c) cas 2 : Définition par défaut ; d) cas 2 : Définition personnalisée

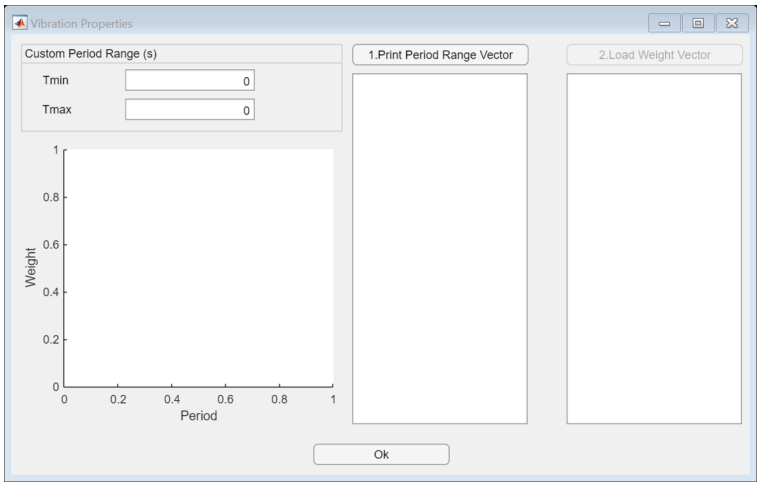

Figure 3.8 Fenêtres pour définir le vecteur poids et les périodes de vibrations pour la méthode MSE

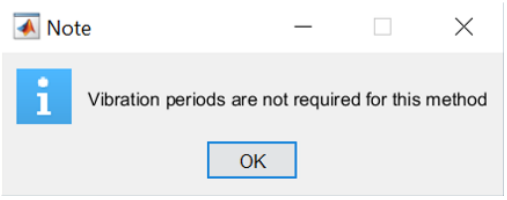

Figure 3.9 Note d'avertissement pour la méthode PGA

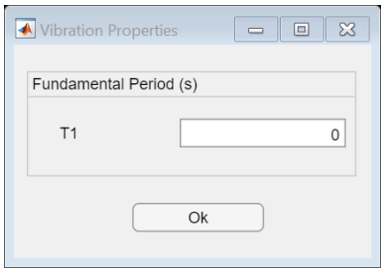

Figure 3.10 Fenêtre pour définir le mode de vibration pour la méthode $S(T_1)$

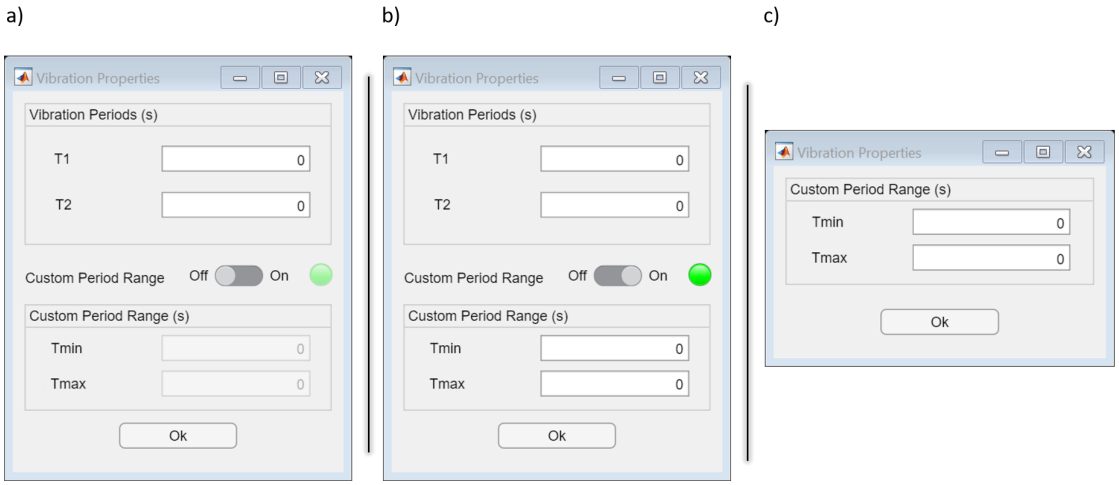

Figure 3.11 Fenêtres pour définir les périodes de vibrations pour la méthode T_2-1.2T_1 ; a) cas 1 : Définition par défaut ; b) cas 1 : Définition personnalisée ; c) cas 2 : Définition personnalisée

approprié. Le fichier devrait être chargé sous formes de colonnes, la première est le vecteur de périodes en secondes alors que la deuxième est le vecteur d'accélération spectrale en g. Après l'avoir chargé, le spectre cible est tracé parallèlement sur un tableau et une figure.

5-Number of Ground Motions :

L'utilisateur doit aussi définir le nombre d'accélérogrammes à imprimer. Ce nombre est fixé par défaut sur 11, mais peut être modifié selon le choix de l'usager.

6-Scale Factor Limit :

Cette option est présentée sur la figure 3.12, elle permet d'éviter la sélection d'accélérogrammes étalonnés ayant des facteurs très faibles ou importants. Le premier choix est par défaut, ou la limite est appliquée selon les recommandations de la méthode d'étalonnage choisis. Dans le cas ou l'utilisateur veut personnaliser cette limite, il suffit de sélectionner "Custom" sur le menu déroulant pour ensuite introduire ces limites sur le panneau "Scale Factor limit".

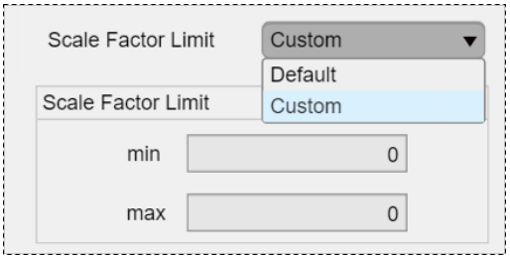

Figure 3.12 Menu de déroulement pour l'option Scale Factor Limit

7-Upload Data :

Pour charger sa base de données, l'usager doit transférer un dossier qui comprend un ensemble de fichier *.txt .Le format de ce dernier est présenté sur la figure 3.13, pour le cas 1. Les colonnes 1 et 2 définissent les vecteurs de temps en seconde et d'accélérations du sol en g, respectivement. Le format pour le cas 2 est présentée sur la figure 3.14. Le fichier devrait contenir 4 colonnes au total. Chaque couple de colonnes successives décrit le contenu d'une composante sismique. Indépendamment, ces couples de colonnes ont le même format décrit pour le cas 1.

8-Run :

Ce panneau est composé de deux boutons. Après avoir introduit tout les données nécessaires, il suffit de cliquer sur le bouton "Start" pour lancer les analyses. Une fois celles-ci sont finies, l'utilisateur peut télécharger les accélérogrammes étalonnés et imprimés en cliquant sur le bouton "Load".

Nahanni_Site1_ENR.txt - Notepad

File Edit Format View Help

0	-1.18E-02
0.005	7.82E-03
0.01	-1.74E-03
0.015	1.41E-03
0.02	1.12E-03
0.025	-3.53E-03
0.03	-5.69E-03
0.035	-8.60E-03
0.04	-9.51E-03
0.045	-7.81E-03
0.05	-8.41E-03
0.055	-1.21E-02
0.06	-1.28E-02
0.065	-1.07E-02
0.07	-9.80E-03
0.075	-7.18E-03
0.08	-2.24E-04
0.085	6.07E-03
0.09	1.12E-02
0.095	7.02E-03
0.1	1.06E-03
0.105	-3.63E-03
0.11	-1.95E-02
0.115	-2.23E-02
0.12	-1.35E-02
0.125	-1.01E-02
0.13	-3.47E-04
0.135	4.66E-03
0.14	-6.52E-04
0.145	-4.76E-03
0.15	-1.04E-02
0.155	-1.69E-02
0.16	-1.46E-02
0.165	-7.42E-03
0.17	4.79E-04
0.175	8.66E-03
0.18	5.44E-03
0.185	-1.08E-03
0.19	-4.38E-04
0.195	-1.89E-02
0.2	-2.86E-02
0.205	-1.31E-02
0.21	-7.37E-03
0.215	2.30E-03
0.22	6.44E-03

Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

Figure 3.13 Format de la base de données pour le cas 1

Nahanni_Site1.txt - Notepad

File Edit Format View Help

0	-1.18E-02	0	1.25E-02
0.005	7.82E-03	0.005	1.52E-03
0.01	-1.74E-03	0.01	3.69E-03
0.015	1.41E-03	0.015	-1.52E-03
0.02	1.12E-03	0.02	-7.79E-03
0.025	-3.53E-03	0.025	-7.23E-03
0.03	-5.69E-03	0.03	-4.50E-03
0.035	-8.60E-03	0.035	1.09E-03
0.04	-9.51E-03	0.04	7.26E-03
0.045	-7.81E-03	0.045	9.73E-03
0.05	-8.41E-03	0.05	1.11E-02
0.055	-1.21E-02	0.055	1.42E-02
0.06	-1.28E-02	0.06	1.59E-02
0.065	-1.07E-02	0.065	1.55E-02
0.07	-9.80E-03	0.07	1.54E-02
0.075	-7.18E-03	0.075	1.53E-02
0.08	-2.24E-04	0.08	1.26E-02
0.085	6.07E-03	0.085	1.33E-02
0.09	1.12E-02	0.09	1.47E-03
0.095	7.02E-03	0.095	-1.74E-02
0.1	1.06E-03	0.1	-1.26E-02
0.105	-3.63E-03	0.105	-8.76E-03
0.11	-1.95E-02	0.11	-3.72E-03
0.115	-2.23E-02	0.115	1.04E-02
0.12	-1.35E-02	0.12	1.27E-02
0.125	-1.01E-02	0.125	1.47E-02
0.13	-3.47E-04	0.13	1.62E-02
0.135	4.66E-03	0.135	1.28E-02
0.14	-6.52E-04	0.14	4.90E-03
0.145	-4.76E-03	0.145	-1.12E-04
0.15	-1.04E-02	0.15	-4.08E-05
0.155	-1.69E-02	0.155	-2.04E-03
0.16	-1.46E-02	0.16	2.84E-03
0.165	-7.42E-03	0.165	9.50E-03
0.17	4.79E-04	0.17	9.61E-03
0.175	8.66E-03	0.175	7.64E-03
0.18	5.44E-03	0.18	7.98E-03
0.185	-1.08E-03	0.185	8.46E-04
0.19	-4.38E-04	0.19	-1.05E-02
0.195	-1.89E-02	0.195	-1.25E-02
0.2	-2.86E-02	0.2	-1.07E-02
0.205	-1.31E-02	0.205	-1.98E-03
0.21	-7.37E-03	0.21	9.69E-03
0.215	2.30E-03	0.215	1.54E-02
0.22	6.44E-03	0.22	1.87E-02

Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

Figure 3.14 Format de la base de données pour le cas 2

9-Group Tab UI Figure :

Comme résultats, 4 graphiques sont tracés. Des figures sont mises en place pour que l'utilisateur puisse comparer graphiquement le spectre cible avec les différents spectres de réponses sélectionnés. S'il existe une différence significative entre ces deux entités, l'utilisateur peut charger une base de données plus appropriée ou tout simplement modifier quelques paramètres d'entrées pour améliorer cette compatibilité.

-L'onglet Target Spectrum : Trace le spectre cible définis par l'utilisateur.

-L'onglet Selected ground motions : Trace le spectre cible versus les spectres de réponses sélectionnés.

-L'onglet Scaled ground motions : Trace le spectre cible versus les spectres de réponses étalonnés.

-L'onglet Final Scaling : Trace le spectre cible versus les spectres de réponses corrigés par un deuxième facteur d'étalonnage.

10-UI Table :

Le tableau résume les résultats concernant chaque accélérogramme imprimé. Soit, les facteurs d'étalonnages finaux et les paramètres d'optimisations pour post-sélection.

Description du menu d'étalonnage pour l'Ouest du Canada

Les composantes de l'interface d'utilisation de l'onglet "Western canada" sont présentés sur la figure 3.15. De la même manière, les boutons affichés sur cette figure, sont utilisés pour différencier entre les différentes fonctionnalités sur le texte accompagné.

Dans cet onglet, les directives du commentaire J du CNB 2015 ont été programmés. Plus précisément, la méthode d'étalonnage B de la section 2.1.2.b. En général, les fonctionnalités de cet onglet sont similaires à ceux de l'onglet précédent. Les changements établis sont discutés ci-dessous.

1-Site Specific Scenarios :

Selon les recommandations du CNB 2015, l'utilisateur a le droit de sous-diviser l'intervalle de la période cible à sa guise. Ceci est dans le but d'avoir des secousses qui représentent mieux l'aléa sismique. Cette option permet à l'utilisateur de lancer deux cas d'analyse. Le premier cas peut être opté en cochant le bouton radio ''Two". Ce dernier convient à l'étude de deux scénarios TRS1 et TRS2 en subdivisant la période cible TR en deux sous intervalles. En revanche, le deuxième cas est adopté en cochant le bouton radio ''Three" ou trois scénarios TRS1, TRS2 et TRS3 sont définis.

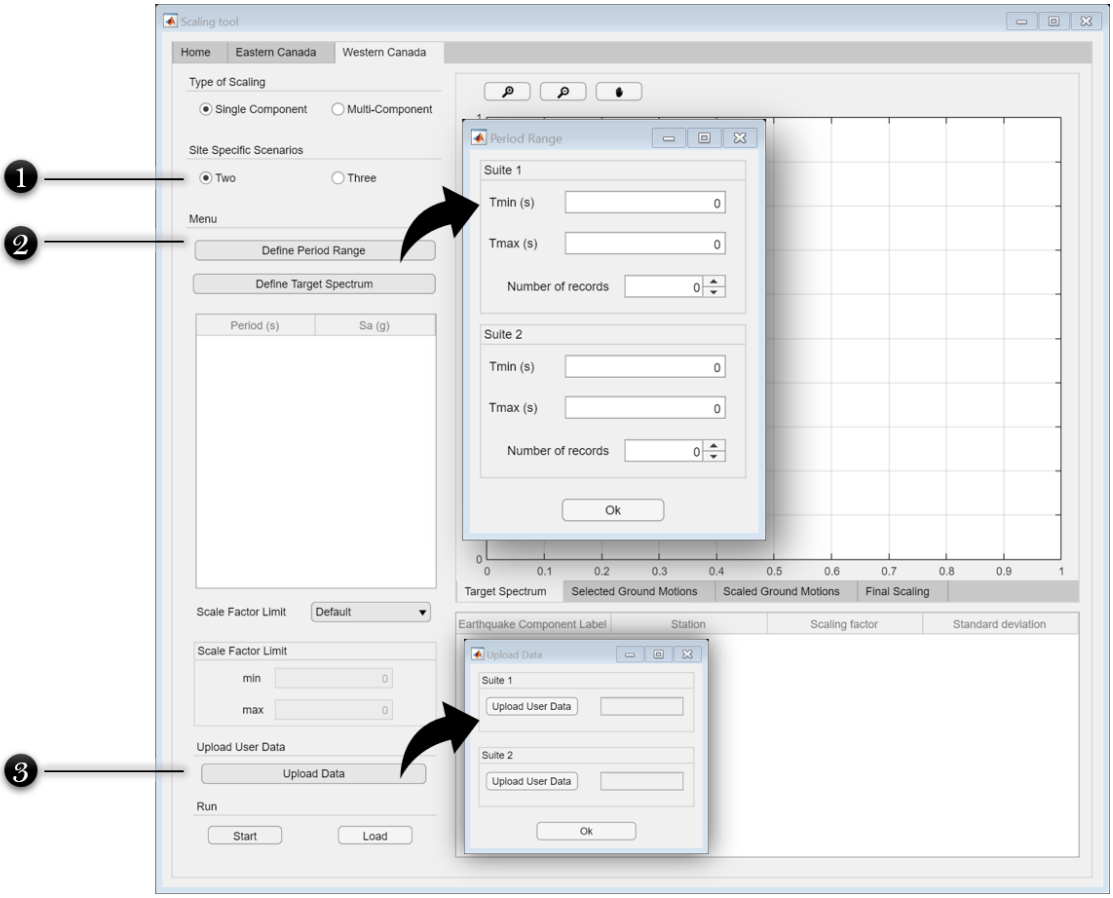

Figure 3.15 Interface graphique principale de l'onglet Western Canada

2-Define Period Range :

Selon le nombre de scénarios sélectionnés, une fenêtre surgit permettant à l'utilisateur de définir les sous intervalles de la période cible. Aussi, le nombre d'accélérogrammes désiré par scénario doit être introduit. La figure 3.16 est une présentation des différentes fenêtres qui apparaissent pour donner suite à l'initialisation du bouton.

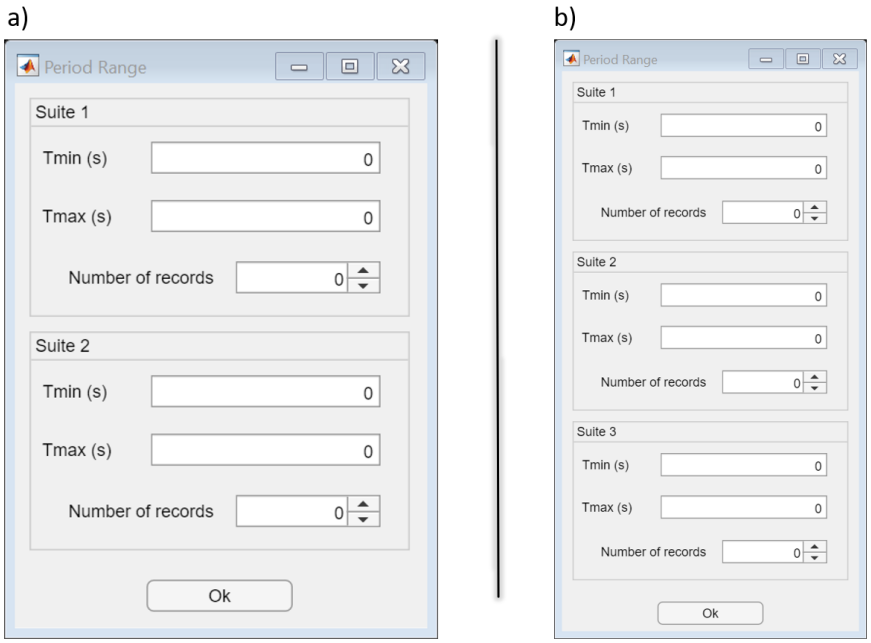

Figure 3.16 Fenêtres pour définir les périodes cibles et le nombre d'accélérogrammes requis par scénario ; a) Pour deux scénarios ; b) Pour trois scénarios

3-Upload Data :

Pour simplifier le chargement des différentes bases de données. Des fenêtres sont optimisées pour guider l'utilisateur dans cette tâche. Le format de la base de données est comme expliqué précédemment. Comme remarqué sur la figure 3.17, un dossier doit être préparé et chargé pour chaque scénario d'étude.

3.3.4 Attributs additionnels de l'outil de calcul

Comme décrit dans les sections précédentes, l'ensemble de la boîte à outil est intuitivement conçu dans le but de créer un outil convivial et universellement accessible. Ainsi, permettant de créer des spectres de réponses adaptés au spectre cible de conception. La boîte à outils est créée comme un outil simple et explicite. Des messages d'erreurs sont fournis à chaque niveau pour informer l'utilisateur des données saisies manquantes ou erronées. La figure 3.18

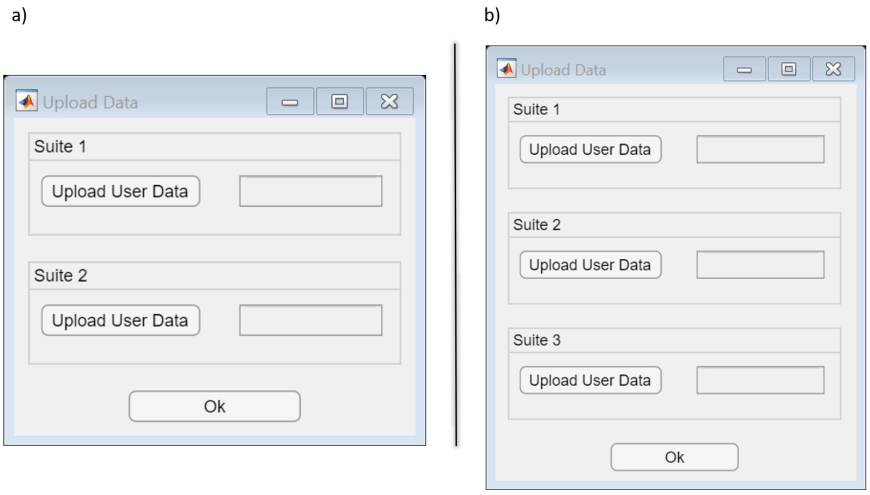

Figure 3.17 Fenêtres pour charger les bases de données par scénario ; a) Pour deux scénarios ; b) Pour trois scénarios

illustre quelques exemples :

- Fenêtre a : S'affiche lorsque l'utilisateur exige un nombre d'accélérogrammes étalonnés plus grand que le nombre disponible dans la base de données chargée.
- Fenêtre b : S'affiche lorsque l'utilisateur introduit de façon erronée les périodes de vibration de la structure étudiée.
- Fenêtre c : S'affiche lorsque la dimension du vecteur poids est supérieure ou inférieure à la dimension du vecteur de la période cible.
- Fenêtre d : S'affiche lorsque l'utilisateur introduit des valeurs non numériques.
- Fenêtre e : S'affiche lorsque l'utilisateur lance l'analyse sans définir un spectre de conception.
- Fenêtre f : S'affiche lorsque l'utilisateur définis une limite de filtrage sur les facteurs d'étalonnage non disponible.

D'autres exemples de messages d'alertes et de confirmations sont présentés sut la figure 3.19

- Fenêtre a : Barre de progression du processus d'étalonnage. Elle permet à l'utilisateur d'estimer le temps de calcul nécessaire.
- Fenêtre b : Barre de progression du processus de calcul des spectres de réponses.
- Fenêtre c : Note d'avertissement du calcul d'un deuxième facteur d'étalonnage.
- Fenêtre f : Confirmation de chargement de la base de données.
- Fenêtre e : Note d'avertissement du non calcul d'un deuxième facteur d'étalonnage.

En outre, dans le but d'informer les nouveaux utilisateurs sur les données d'entrée typiques, certaines valeurs dans la boite à outils sont fournies par défaut sur les champs d'informations. Des outils de zoom avant, zoom arrière et de vue panoramique sont mis en place pour mieux

visualiser et juger le contenu des graphiques tracés.

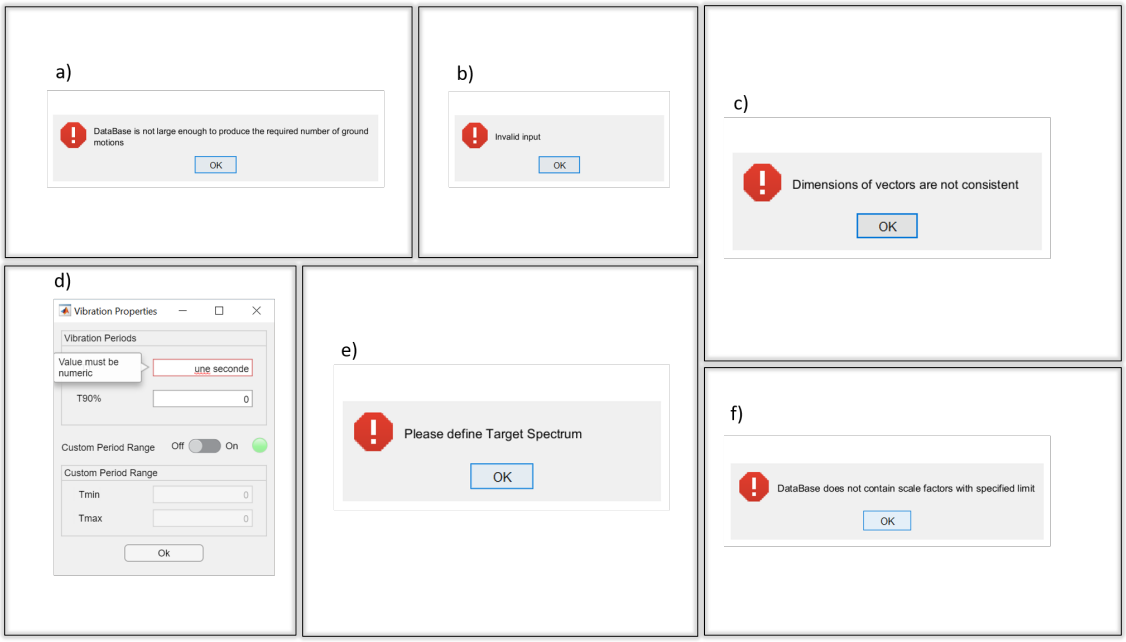

Figure 3.18 Exemples de message d'erreur ; a) Pour une base de données insuffisante ; b) Pour des périodes de vibrations non-consistantes ; c) Pour un vecteur poids trop large ou trop petit ; d) Pour les entrées non numériques ; e) Pour un spectre cible non définis ; f) Pour des facteurs d'étalonnages non trouvés

3.4 Exemple de calcul

Pour mieux comprendre ses différentes fonctionnalités, un exemple d'application de l'outil de calcul est présenté.

3.4.1 Mise en situation

L'ingénieur civil veut évaluer le comportement sismique non linéaire d'un barrage poids en béton située à Montréal. Plus précisément, les effets de fissuration et de glissement aux joints béton-rocher à la base du barrage. Pour évaluer la sensibilité de celui-ci aux secousses sismiques, une des étapes importantes est d'étalonner un ensemble d'accélérogrammes représentant le mieux l'aléa sismique de la région en question. D'où l'utilité de la boîte à outil.

L'objectif est donc de produire un ensemble d'accélérogrammes étalonnés pour fin d'analyse dynamique temporelle sur un modèle numérique d'un barrage poids localisé à Montréal pour un sol de type A ($\bar{V}_{s30} > 1500$). Pour démonstration, deux méthodes d'étalonnages sont

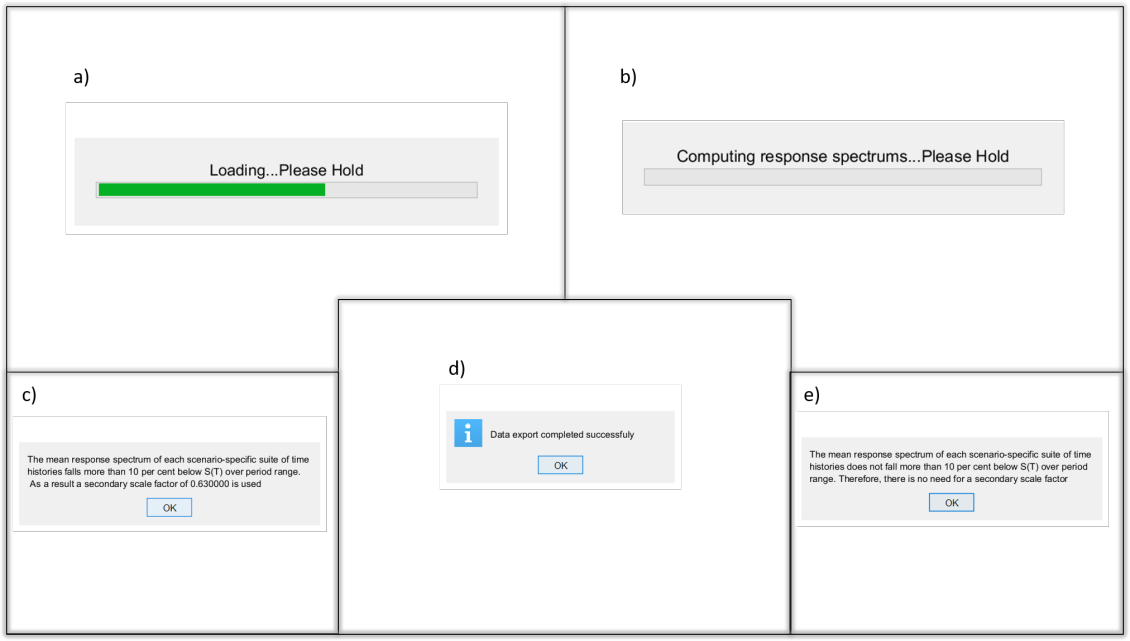

Figure 3.19 Exemples d'alertes et de confirmations ; a) Progression d'ètalonnage ; b) Progression du calcul des spectres de réponses ; c) Avertissement de calcul d'un deuxième facteur d'étalonnage ; d) Confirmation de chargement de la base de données ; e) Avertissement de la non nécessité d'un deuxième facteur d'étalonnage

élaborées. Notamment, les méthodes proposées par le code national du bâtiment (CNB 2015) et PEER 2010a (MSE).

3.4.2 Barrage Étudié

Le barrage poids choisis pour cet exemple a une hauteur de 35 m, une largeur de 27.5 m à la base et de 5 m à la crête (voir figure 3.20). Une masse volumique $\rho_d = 2400kg/m^3$, un coefficient de Poisson $\upsilon = 0.2$, et un module d'élasticité $E_d = 25GPA$ sont choisis comme propriétés mécaniques du béton et le ratio d'amortissement visqueux retenu est de 5%. Le modèle numérique est développé à l'aide d'ADINA® en utilisant un maillage par éléments finis solides 2D linéaires à 4 nœuds. Un encastrement est défini à la base pour simuler une fondation rigide.

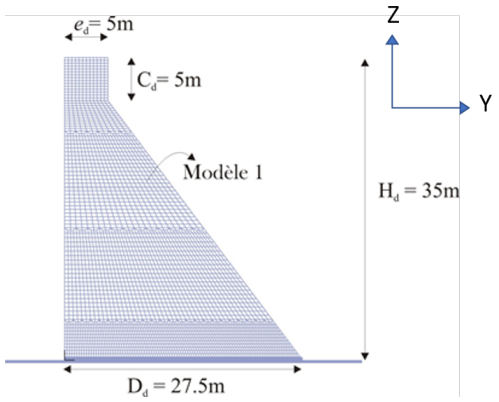

Figure 3.20 Géométrie du barrage poids

3.4.3 Paramètres de calcul

Modes de vibration fondamental et supérieurs

Une analyse modale est effectuée en attribuant un comportement élastique linéaire au béton armé. Cette analyse va permettre de définir les modes de vibration fondamental et supérieurs de la structure. Le tableau 3.1 présente les périodes par mode étudié en relation avec leur degré de sollicitation de la masse totale.

Tableau 3.1 Modes de vibration du barrage étudié

Mode	Fréquence	% de masse accumulée (Y)	% de masse accumulée (Z)	Période (s)
1	9.20E+00	43.16	1.43	1.09E-01
2	2.16E+01	69.91	1.43	4.63E-02
3	3.02E+01	72.23	61.81	3.31E-02
4	3.71E+01	81.78	63.68	2.70E-02
5	5.30E+01	85.52	63.73	1.89E-02
6	6.42E+01	85.89	70.94	1.56E-02
7	6.75E+01	86.15	77.99	1.48E-02
8	7.05E+01	89.32	78.16	1.42E-02
9	7.65E+01	89.63	78.43	1.31E-02
10	7.90E+01	89.67	79.81	1.27E-02
11	8.64E+01	90.40	79.81	1.16E-02
12	9.29E+01	90.68	80.08	1.08E-02

Format et préparation de la base de données

À titre de cas d'étude, des séismes simulés vont être utilisés. Les caractéristiques de ces séismes sont résumées sur le tableau 3.2. La sélection de la base de données tient en compte la période fondamentale de vibration du barrages (T1= 0.109 s) et des dé-agrégations sismiques fournies par la commission géologique du Canada pour la ville de Montréal. Puisque le modèle numérique est en 2D, on choisit de faire un étalonnage sur des composantes sismiques uniques. Donc, Le format de la base de données devrait être comme expliqué sur le cas 1 de la fonctionnalité "Upload User Data" (voir Figure 3.21).

Tableau 3.2 Caractéristiques de la base des données simulée

Ensemble des secousses sismques	
No.D'enregistrements	42
Magnitude (Mw)	6
Rh (km)	15
Min.Rf (km)	10.7
Max.Rf (km)	30.7

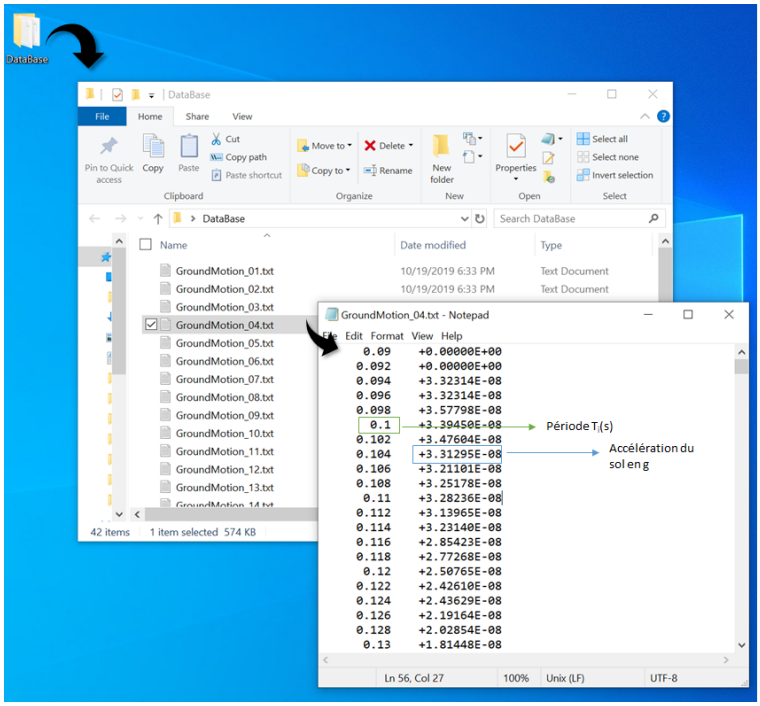

Figure 3.21 Format de la base de données à charger

Exemple de champs d'entrée remplis pour la méhthode du CNB 2015

Pour cette méthode, on opte pour les informations d'entrée suivantes. Premièrement, comme l'étalonnage est fait sur des composantes sismiques horizontales et uniques, le bouton radio "Single Component" est coché sur le panneau "Type of Scaling". Ensuite, pour suivre les directives d'étalonnage du code national du bâtiment 2015, la méthode NBCC 2015 est sélectionnée sur le menu déroulant "Scaling method". Par ailleurs, en activant le bouton "Define Vibration Periods", on introduit les périodes fondamental T_1 et supérieur T90% du barrage étudié en se référant au tableau 3.1. Ces informations vont permettre à l'outil code de calculer la plage de la période cible TR. La prochaine étape consiste à charger le spectre cible. Pour cet exemple, le spectre cible de la ville de Montréal d'un sol de type A est enregistré sur un fichier *.txt. Le format de ce dernier est montré sur la figure 3.22. Ensuite le nombre d'acclérgrammes désiré devrait être introduit. Finalement, la base de données est chargée en activant le bouton "Upload User Data".

Exemple de champs d'entrée remplis pour la méthode MSE

On désire de refaire le même type d'analyses mais avec une méthode d'étalonnage différente. Cela dit, les fonctionnalités "Type of Scaling", "Define Target Spectrum", "Number of ground Motions", "Scale Factor Limit" et "Upload User Data" restent pareils. Deux changements sont à effectuer. Soit la méthode d'étalonnage sur le menu déroulant "Scaling method" et la définition de la plage de période TR en activant le bouton "Define Vibration Periods" (voir la figure 3.23). Il est a noter que le vecteur poids devrait avoir la même longueur que le vecteur T généré avec le bouton "1.Print Period Range Vector". Pour cet exemple un vecteur poids unitaire est utilisé.

3.4.4 Résultats

Les figures 3.25 et 3.27 représentent les résultats affichés pour la méthode CNB 2015 et MSE respectivement. Pour juger la pertinence de ces résultats, les spectres de réponses sont tracés avec le spectre cible sur des onglets différents. Les détails de ces derniers peuvent être consulté sur les figures 3.26 et 3.28 Aussi, le tableau affiché énumère les facteurs d'étalonnage et les paramètres de sélection final par accélérogramme sélectionné. Celui-est aussi imprimé sur un fichier appelé "EQLIST.txt". En cas de calcul d'un facteur d'étalonnage secondaire, l'utilisateur est averti par la note sur la figure 3.24

Sur la figure 3.29, il est possible de voir qu'en outre de l'affichage, tout les accélérogrammes étalonnées sont imprimés.

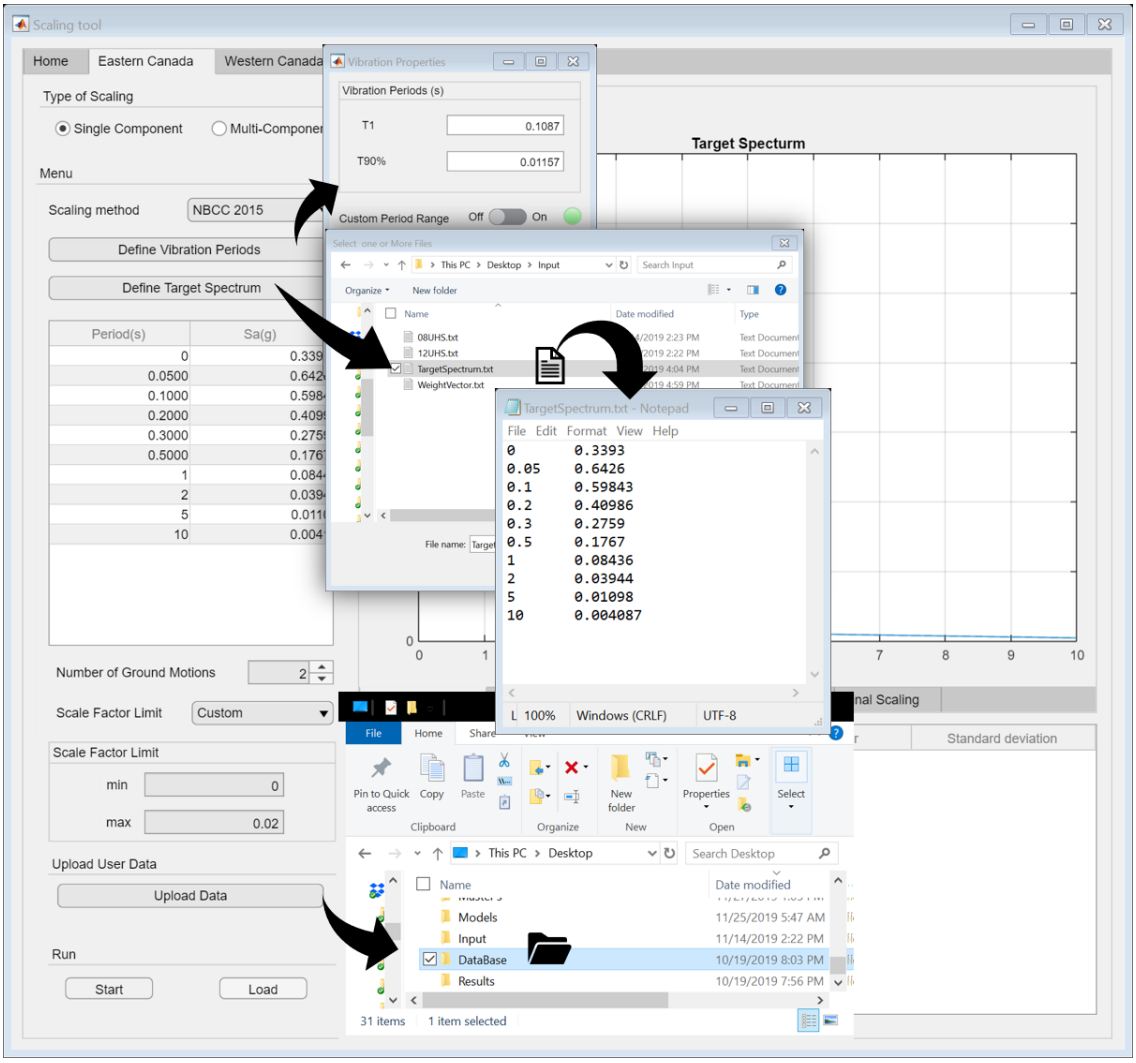

Figure 3.22 Exemple de champs d'entrée pour la méthode du CNB 2015

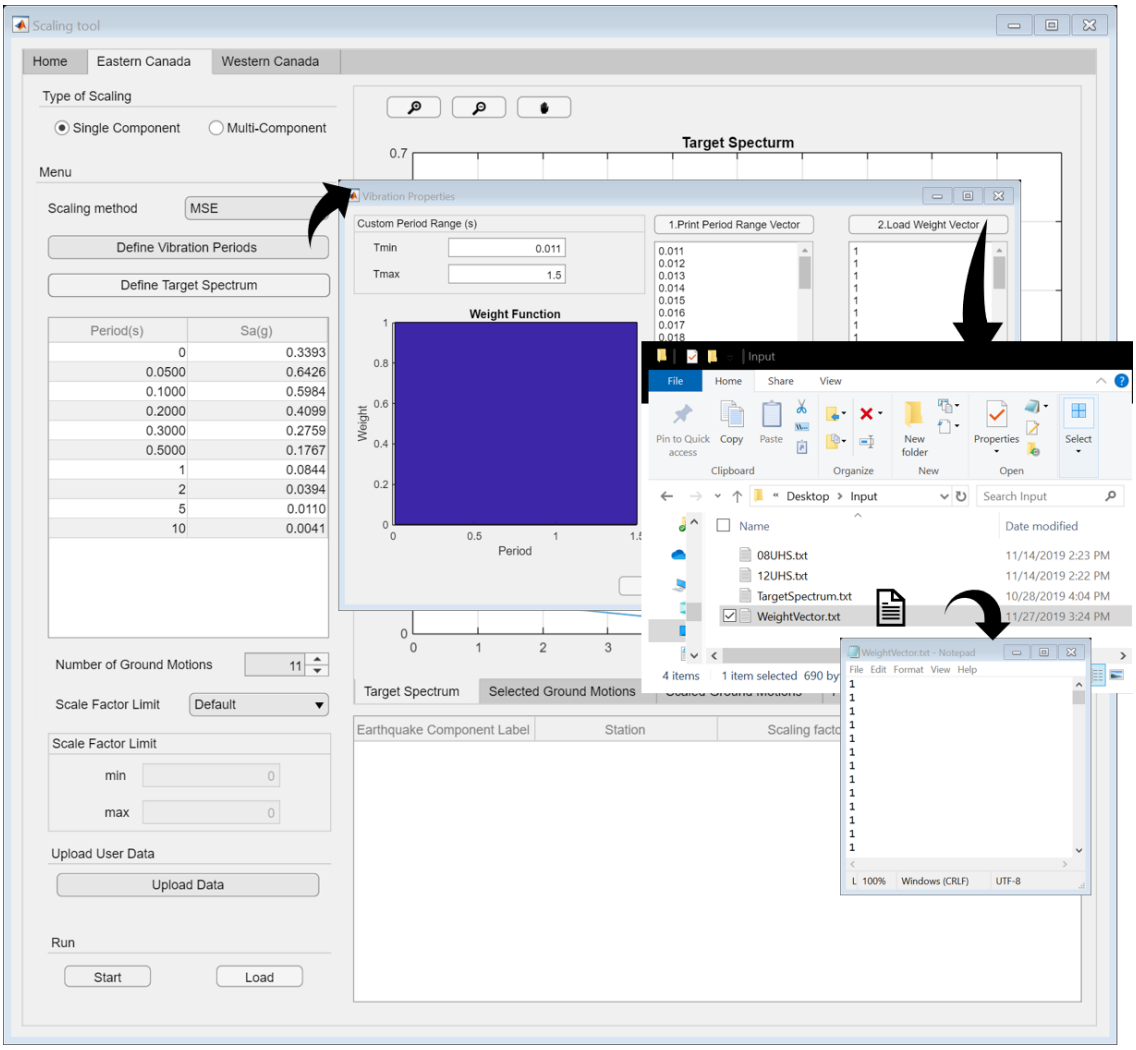

Figure 3.23 Exemple de champs d'entrée pour la méthode MSE

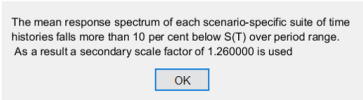

Figure 3.24 Avertisement d'un calcul de facteur d'étalonnage secondaire

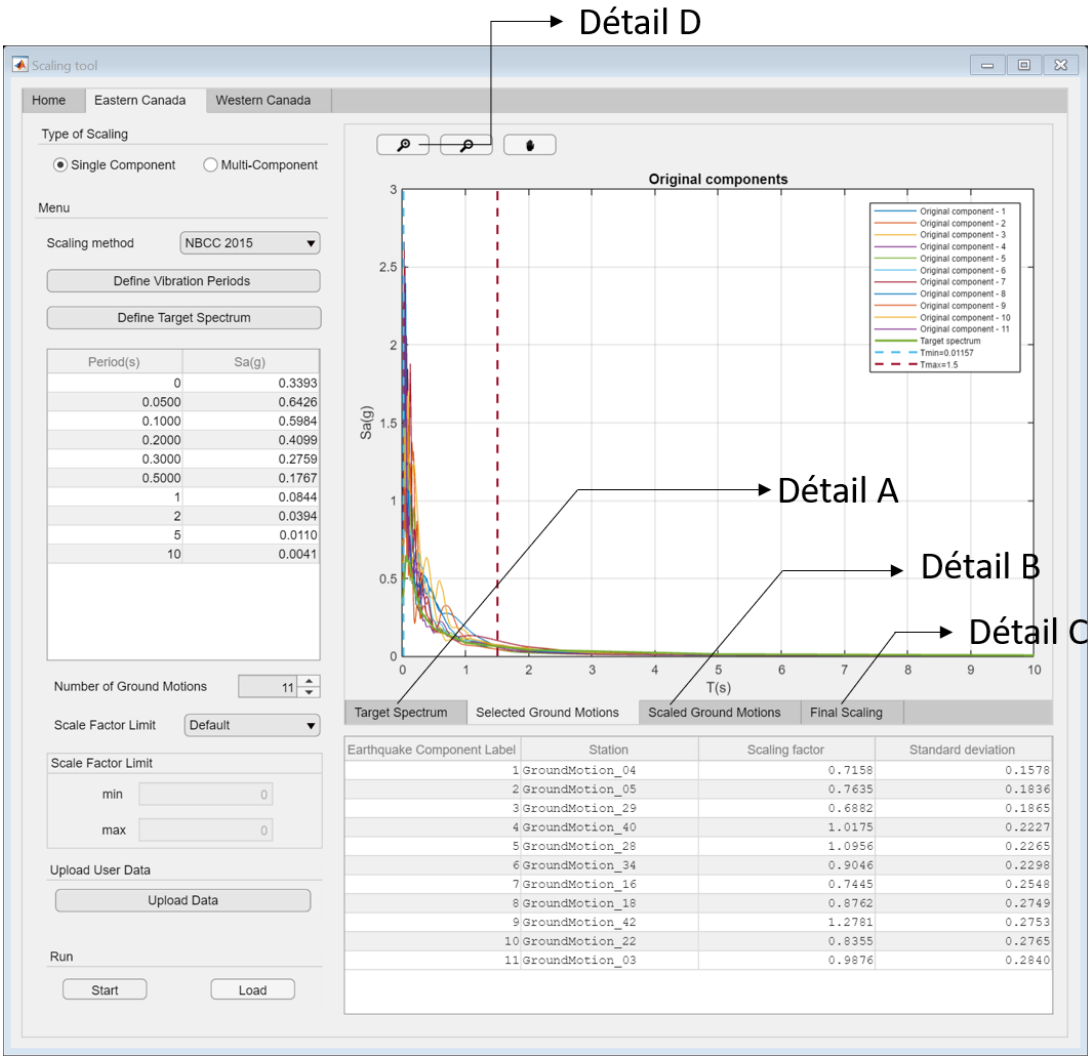

Figure 3.25 Résultats affichés de la méthode CNB 2015

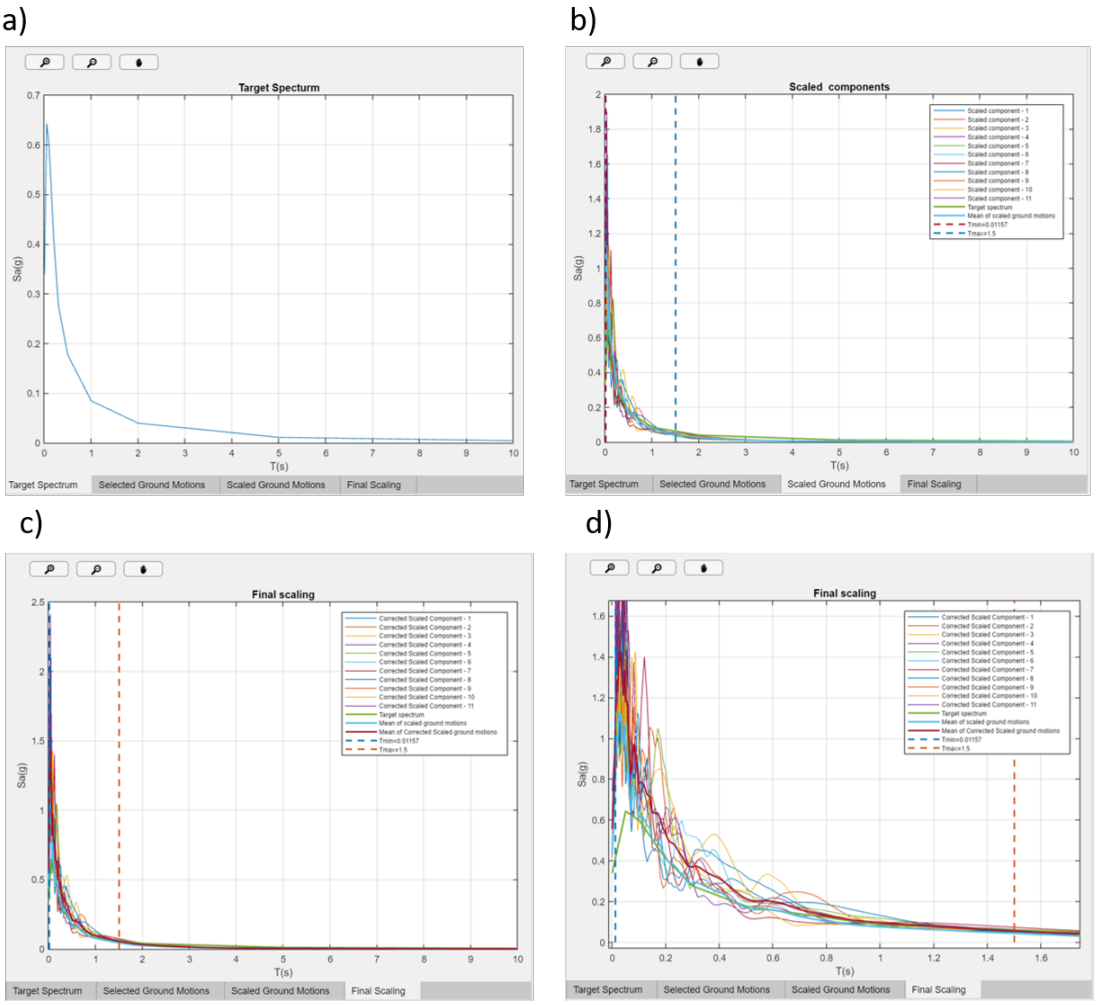

Figure 3.26 Résultats tracés de la méthode NBCC 2015 ; a) Détail A ; b) Détail B ; c) Détail C ; d) Détail D

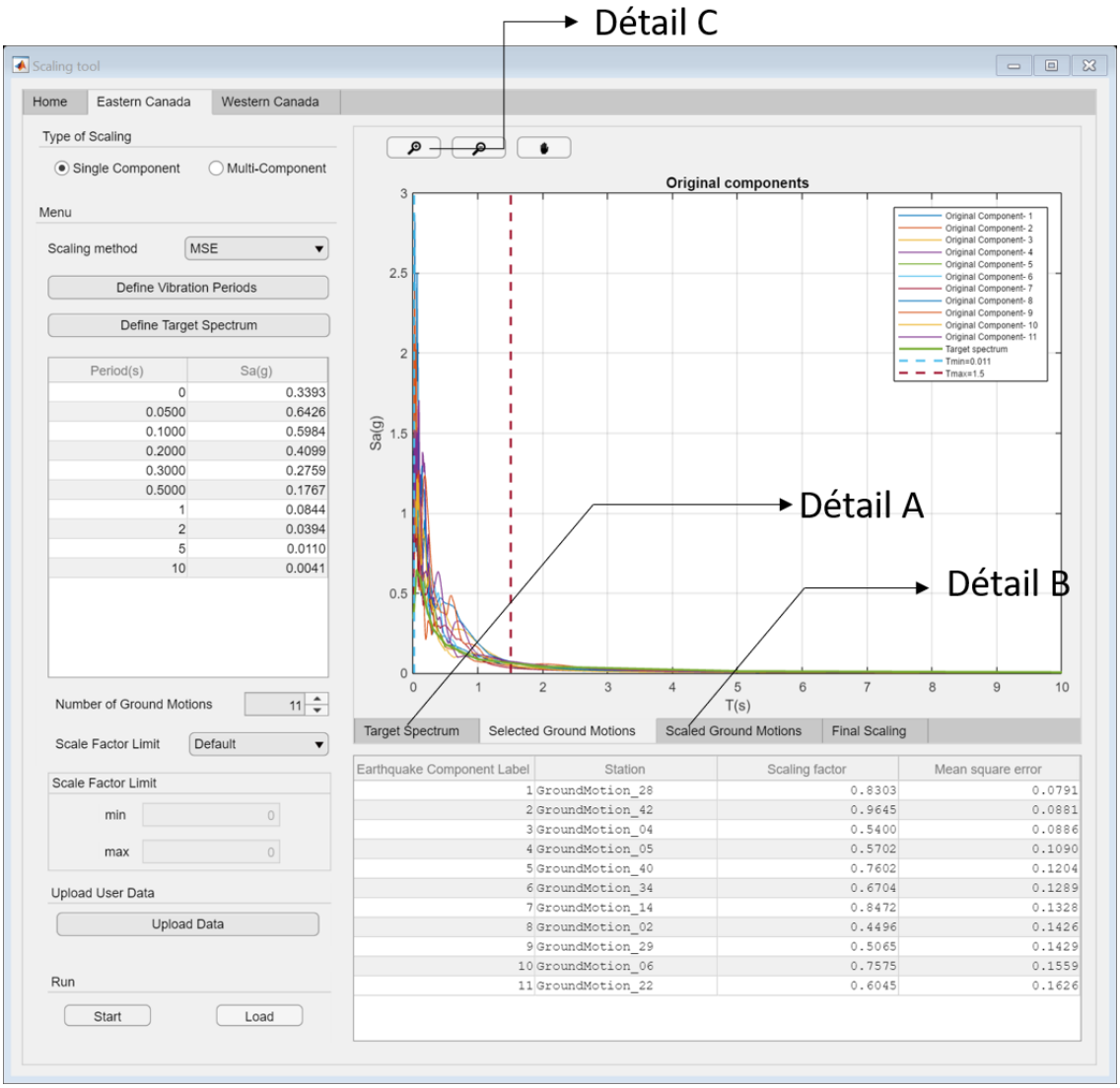

Figure 3.27 Résultats affichés de la méthode MSE

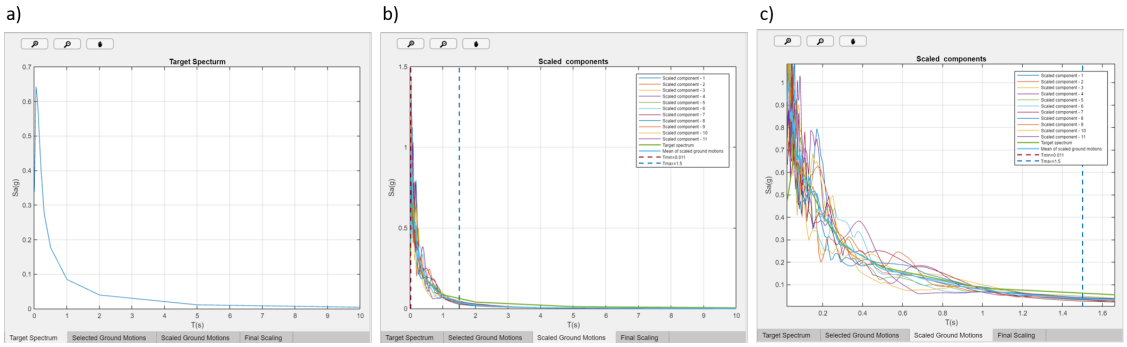

Figure 3.28 Résultats tracés de la méthode MSE ; a) Détail A ; b) Détail B ; c) Détail C

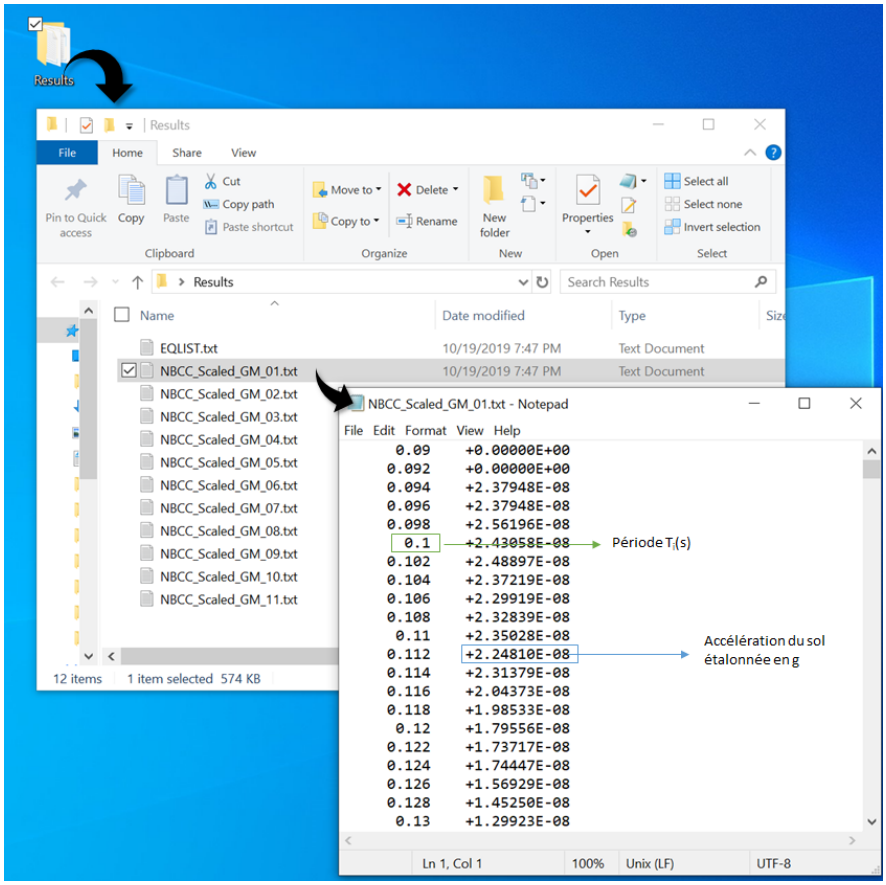

Figure 3.29 Format des résultats imprimés

3.5 Utilisation de l'outil de calcul

Cette section est concentrée principalement sur l'utilité et les contributions de l'outil conçu. Jusqu'à présent, trois projets de recherche ont été menés à l'aide de cet outil. L'objectif de cette section n'est pas de présenter des conclusions ou des recommandations techniques sur un problème d'ingénierie structurelle, mais surtout de montrer de quelle manière cet outil peut être exploité. Les trois projets discutés sont comme suit :

Projet 1 : Conception et évaluation des ponts isolés sismiquement au Québec en tenant compte des effets des basses températures.

Projet 2 : Réponse sismique bidirectionnelle des piliers de pont au Québec.

Projet 3 : Effet d'étalonnage des composantes sismiques bidirectionnelles.

L'outil a contribué sur les deux premiers projets qui ont été réalisés par deux étudiants de de l'école Polytechnique Montréal, Vandal [1] et Asselin [59], respectivement. Ces projets sont présentés brièvement sur les sections qui suivent. Le dernier est mené par l'auteur de ce mémoire et sera présenté en détail sur le chapitre suivant.

Les contributions à ces projets ont aidé à bêta-tester et à valider l'exactitude de l'outil développé.

3.5.1 Projet 1 : Conception et évaluation des ponts isolés sismiquement au Québec en tenant compte des effets des basses températures.

Ce projet a pour objectif de caractériser l'impact des basses températures sur des ponts isolés sismiquement. Pour ce fait, six modèles de ponts fictifs munis d'isolateurs sismiques en élastomères frettés avec noyau de plomb sont étudiés. Des propriétés relatives à la température sont sélectionnées pour ceçevoir ces modèles. Deux types de géométries de ponts sont utilisées. D'ailleurs, les détails sur les paramètres de ponts retenus pour cette étude sont expliqué sur le mémoire de Francis Vandal [1].

Des modèles numériques par éléments finis ont été développés à l'aide du Logiciel CSI Bridge version 20 [60]. D'ailleurs, ces modèles sont illustrés sur les figures 3.30 et 3.31 .

Les six modèles de ponts sont étudiés sur deux localités différentes, à savoir, Montréal et la Malbaie. Pour caractériser leur comportement non-linéaire, des analyses temporelles non-linéaires sont réalisées. Le rôle de l'outil dans ce projet, était de générer un ensemble d'accélérogrammes étalonné pour chaque cas d'étude. Au total, 132 accélérogrammes historiques étalonnés ont été générés (voir figure 3.32 à figure 3.43), et ce, en utilisant la méthode d'étalonnage NBCC 2015.

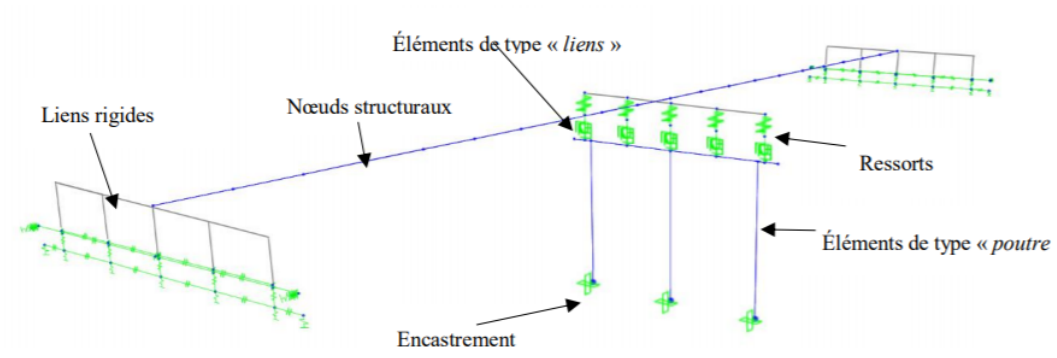

Figure 3.30 Schéma illustrant un modèle numérique d'un pont de géométrie de type 1 développé avec le logiciel CSi Bridge, Tirée de Vandal [1]

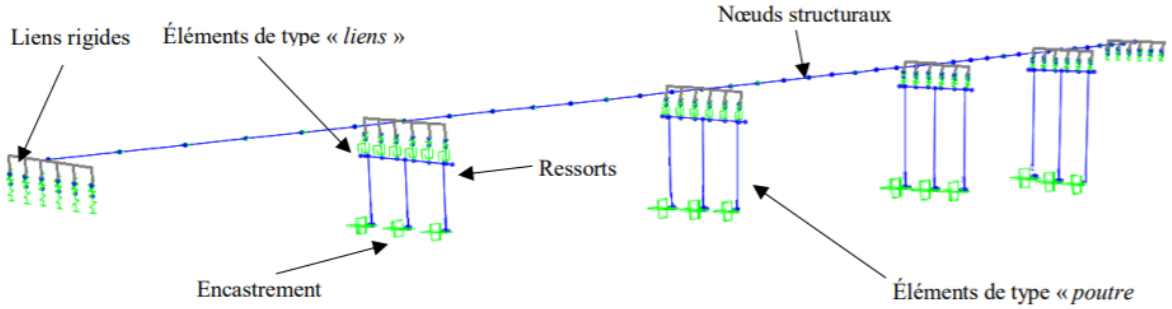

Figure 3.31 Schéma illustrant un modèle numérique d'un pont de géométrie de type 2 développé avec le logiciel CSi Bridge, Tirée de Vandal [1]

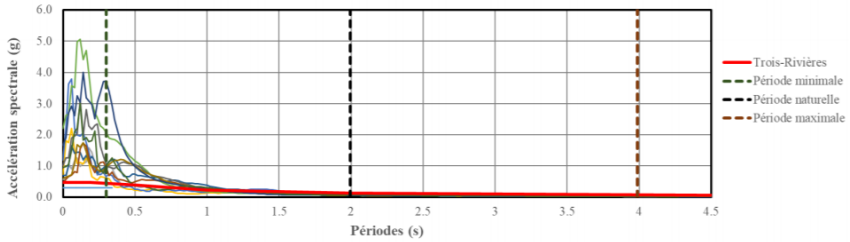

Figure 3.32 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas I à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

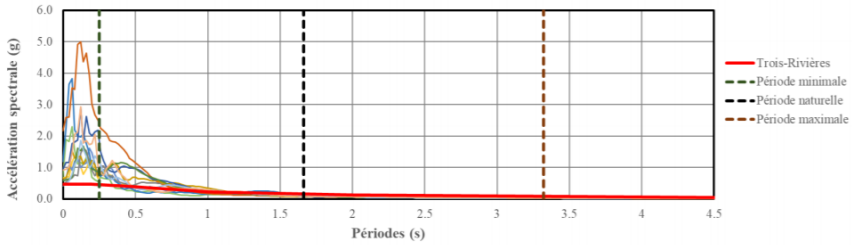

Figure 3.33 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas I à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

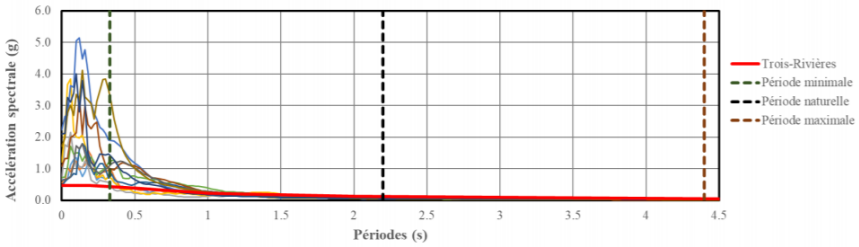

Figure 3.34 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas II à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

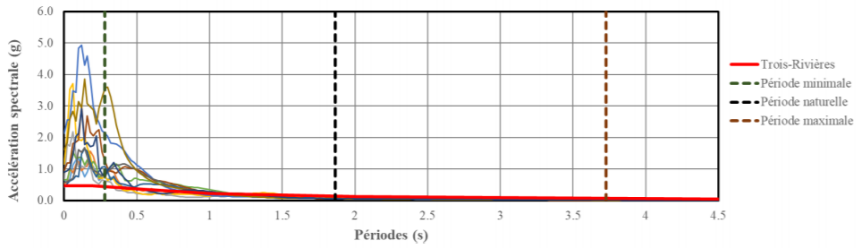

Figure 3.35 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas II à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

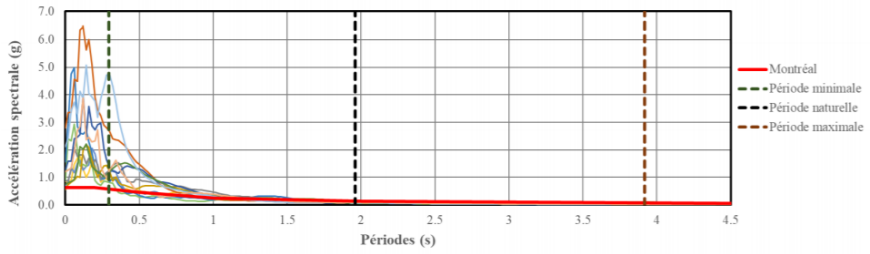

Figure 3.36 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas III à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

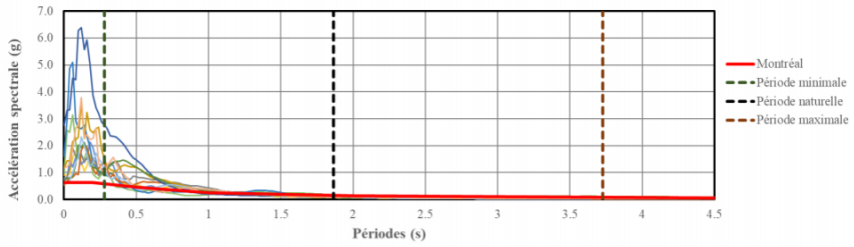

Figure 3.37 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas III à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

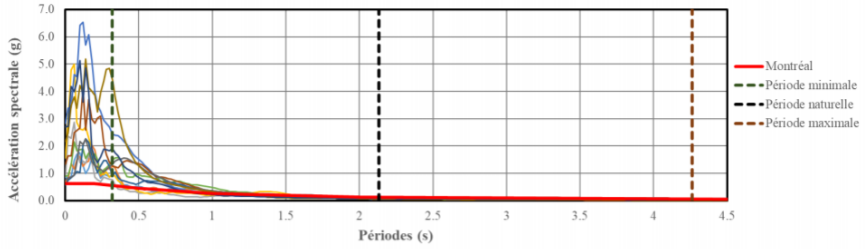

Figure 3.38 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas IV à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

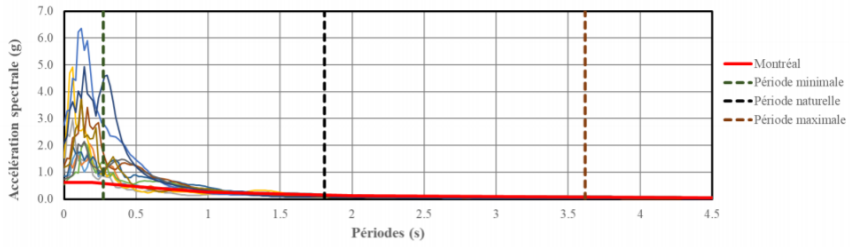

Figure 3.39 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas IV à une température initiale de -30^0C et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

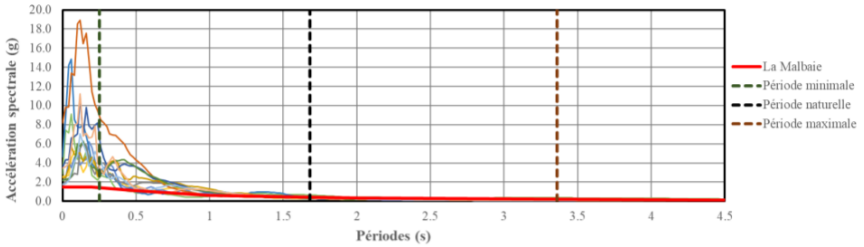

Figure 3.40 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas V à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

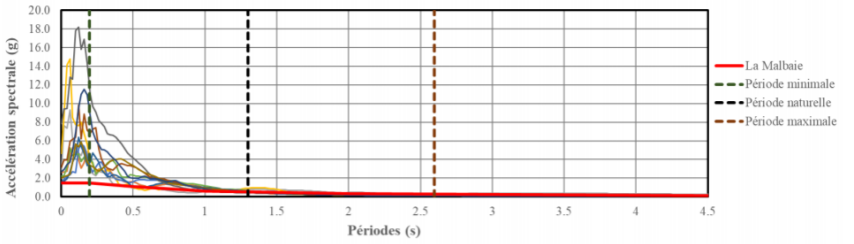

Figure 3.41 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas V à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

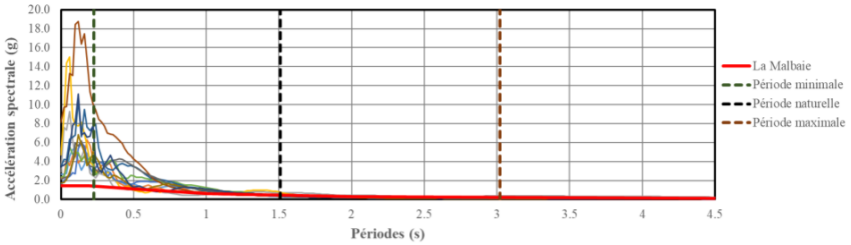

Figure 3.42 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas VI à une température initiale de 20^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

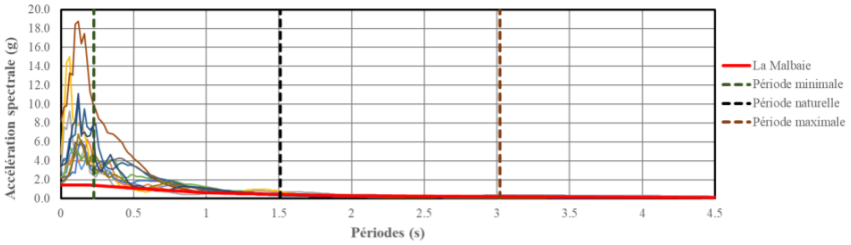

Figure 3.43 Spectres individuels des accélérogrammes étudiés pour le cas VI à une température initiale de -30^oC et comparaison avec le spectre de réponse de la norme S6-14, Tirée de Vandal [1]

Les différentes analyses réalisées à l'aide de l'outil, ont permis de vérifier l'impact des basses températures sur les efforts transmis aux unités de fondations. Il a été dédié que les basses températures peuvent induire à une augmentations d'efforts variante entre 40% et 90%. D'ou l'importance à considérer ces effet lors du processus de conception.

Les résultats et les conclusions détaillés de ce projet peuvent être consultés sur le mémoire de Francis Vandal [1].

3.5.2 Projet 2 : Réponse sismique bidirectionnelle des piliers de pont au Québec

Ce projet actuellement en cours de réalisation, a pour objectif de caractériser l'effet de secousses sismiques bidirectionnelles sur la performance sismique des piliers de pont de types rectangulaires. Les détails de la pile étudiée sont sur la figure 3.44. Une étape essentielle à ce projet consiste à réaliser des analyses dynamiques temporelles linéaires et non-linéaires sur un pont (droit et incliné) construit avec des piles rectilignes et asymétriques à la ville de Montréal. Pour cela, l'outil de calcul a été utilisé pour générer 11 couples d'accélérogrammes étalonnés (voir figure 3.45), et ce, en utilisant la méthode NBCC 2015.

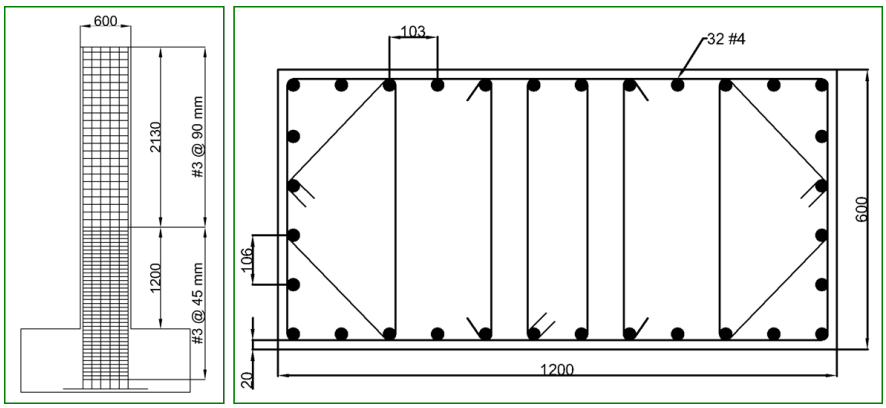

Figure 3.44 Détail de la pile rectangulaire ; a) Vue de profil b) Vue en coupe

Pour le moment, les conclusions de ces analyses ont démontré que [59] :

- L'angle d'incidence provoque une variation importante de la demande sismique pour une seule paire d'accélérogrammes, mais n'a pas d'impact significatif sur la demande sismique moyenne de 11 paires.
- L'angle d'incidence sismique critique pour un accélérogramme est généralement le même pour les analyses linéaires et non linéaires.
- La demande sismique est généralement plus élevée pour le pont incliné que pour le pont droit. La dispersion de la demande sismique est plus élevée pour l'analyse linéaire.

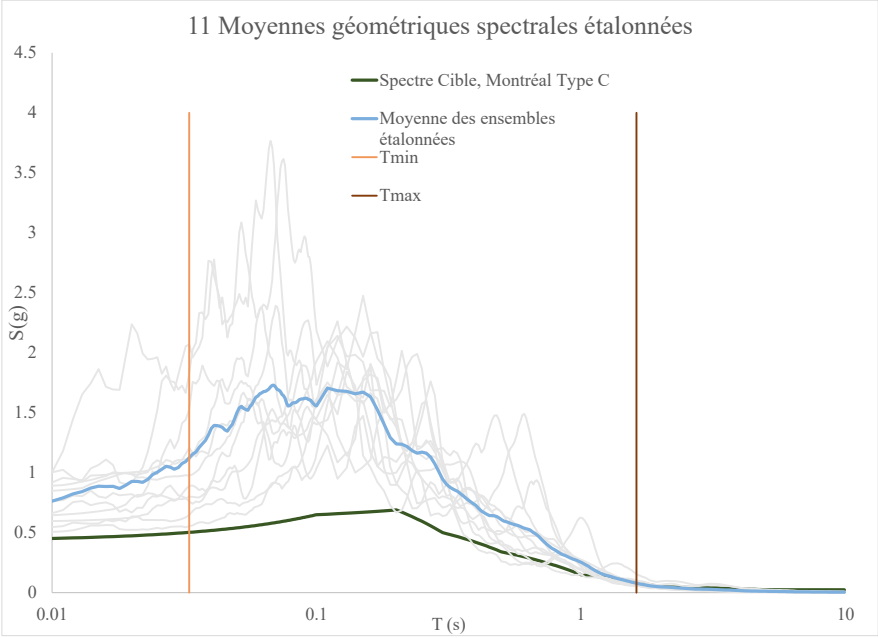

Figure 3.45 Moyennes géométriques étalonnées sur le spectre de conception de Montréal pour un sol de type C

Des résultats plus avancés vont être disponibles prochainement dans le mémoire de Marie-Hélène Asselin [59].

3.6 Conclusions

Une boîte à outils robuste est développée pour générer des accélérations de sol conformes au code de conception. Cet outil est composé de deux onglets principaux, pour l'Est et l'Ouest canadien respectivement. Au total, six approches d'étalonnage y sont intégrées. Les diverses caractéristiques de l'outil, interactive et facile à apprendre, sont expliquées en partie. Son application peut être utile dans les universités, l'industrie et les instituts de recherche. Par exemple, l'outil peut être utilisé dans les bureaux d'études pour mettre en échelle des accélérogrammes destinés aux applications de conception parasismique. Entre autres, il peut également être utilisé dans certaines applications de recherche liées à la sélection et l'étalonnage des mouvements du sol.

CHAPITRE 4 EFFET D'ÉTALONNAGE DES COMPOSANTES SISMIQUES BIDIRECTIONNELLES

4.1 Introduction

Les mouvements sismiques du sol sont enregistrés par des accéléromètres en trois composantes orthogonales, deux orientées dans le plan horizontal et une orientée verticalement. Habituellement, l'effet de la composante verticale sur la réponse sismique est négligé. Par ailleurs, cette composante est souvent ignorée face à l'application de l'agitation horizontale.

Traditionnellement, pour prédire la réponse sismique d'une structure de résistance latérale couplée. Une approche conventionnelle consiste aux directives du CNB2015, où les spectres de réponses sont calculés individuellement pour ensuite étalonner leur moyenne géométrique sur le spectre de conception fournis. Néanmoins, l'utilisation de cette approche ne donne pas une mesure de la demande maximale pour toutes les orientations possibles de l'agitation horizontale. En effet, pour certains systèmes structuraux, la demande spectrale en rotation maximale peut être la caractérisation la plus appropriée. Par ailleurs, pour rester cohérent dans la prédiction de la réponse sismique, l'étalonnage des spectres de demande maximum (majeur et mineur) ne devrait pas être établi sur un spectre de conception moyen géométrique. Une des approches à adopter, et de modifier les équations d'atténuation sismique pour construire deux spectres de conception, un pour la composante majeure et un autre pour la composante mineure. Une autre approche plus simple, consiste à utiliser des relations disponibles dans la littérature, fournissant des ratios entre la réponse spectrale majeure ou mineure et la réponse géométrique moyenne [2].

Pour ce projet, l'objectif principal est d'étudier la sensibilité de la réponse sismique en fonction de l'approche d'analyse choisie par l'ingénieur :

— 1ère approche : Étalonnage des composantes tel qu'enregistrées sur un spectre de conception définis par le CNB2015

— 2ème approche : Étalonnage des composantes principales sur deux spectres de conceptions majeures et mineurs calculés par modification du spectre de conception définis par le CNB2015.

4.2 Systèmes structuraux

Pour cette étude, des modèles de 2 DDL symétriques sont développés (voir figure 4.1). Deux comportements sont modélisés, un linéaire élastique et un autre bilinéaire plastique. De façon générale, ces modèles simplifiés peuvent représenter une colonne simple ou un bâtiment d'un seul étage régulier.

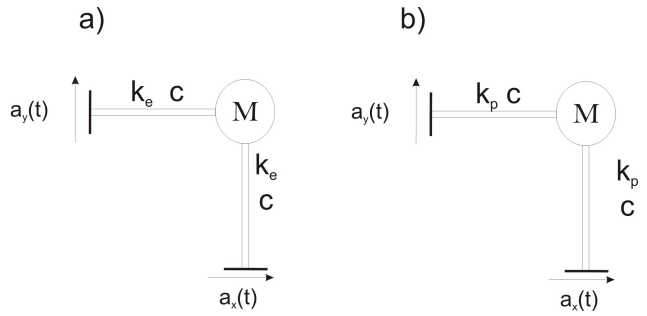

Figure 4.1 Modèle à 2 DDL soumis à une excitation sismique bidirectionnelle : a) comportement linéaire élastique ; b) comportement bilinéaire plastique

Les paramètres descriptifs des différents modèles développés sont calculés en faisant varier les périodes de vibrations naturelles T_x et T_y. Un amortissement visqueux avec un taux d'amortissement de 5% est retenu pour chaque système.

Précisément pour le comportement bilinéaire plastique, un facteur de réduction ductile R_d= 2 est utilisé. La solution est obtenue en utilisant la méthode d'intégration pas à pas de Newmark.

Au total, 10 systèmes structuraux sont construits, 5 avec un comportement linéaire élastique et 5 autres avec un comportement élastoplastique. Les périodes de vibrations sont variées d'un système à un autre pour modéliser plusieurs cas de rigidité et pour évaluer l'interaction bi-axiale.

Les paramètres de calculs retenus sont résumés sur le tableau 4.1

Tableau 4.1 Périodes de vibrations naturelles des systèmes structuraux construit

Système structurel	Paramètres variés	T_x (s)	T_y (s)
1	-	0.5	0.5
2	T_x et T_y	0.1	0.1
3	T_x et T_y	1	1
4	T_y	0.5	0.25
5	T_y	0.5	1

4.3 Séisme étudié

Cette étude est réalisée en utilisant un évènement historique de magnitude 6.9M enregistré à Nahanni sur la station Iverson le 23 décembre 1985 à 5h16. Les composantes horizontales enregistrées sont appelées ENR et ENT. La première indique la direction horizontale radiale, dans le sens éloigné ou vers la source du séisme. La deuxième indique la direction orthogonale à ENR. Les composantes horizontales principales sont appelées H1 et H2. Celles-ci, indiquent la composante majeure et mineure, respectivement.

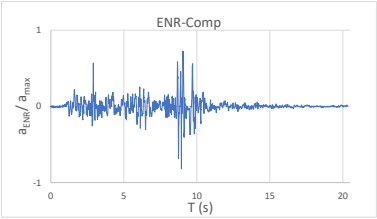

Figure 4.2 Composante ENR

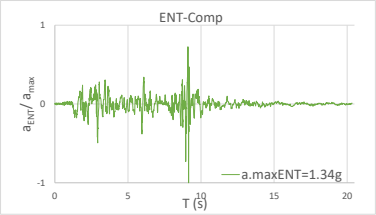

Figure 4.3 Composante ENT

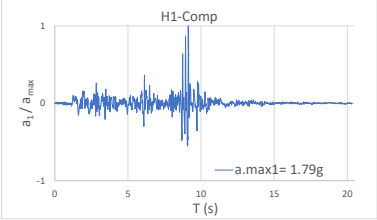

Figure 4.4 composante majeure H1

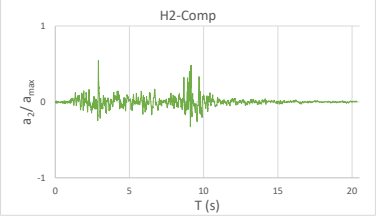

Figure 4.5 composante mineure H2

Ces composantes (voir fugures 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5) ont été successivement transformées et appliqués aux systèmes structuraux selon des angles d'incidences à 30° incréments, pour un total de 6 orientations comprises entre 0° et 150°. La symétrie des modèles à été utilisée pour réduire le nombre d'analyses à effectuer. Une illustration de l'application de ces composantes est présentée sur la figure 4.6

4.4 Étalonnage des composantes horizontales bidirectionnelles

Le spectre d'aléa sismique utilisé pour cette étude est celui de la ville de Montréal pour un type de sol A. Pour chaque système structurel, la méthode NBCC 2015 de l'outil est utilisée pour générer des accélérogrammes étalonnés de deux façons différentes.

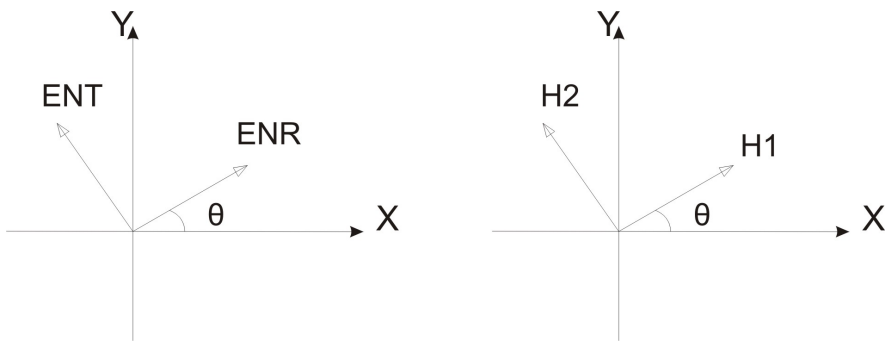

Figure 4.6 Illustration d'application des secousses sismiques horizontales

4.4.1 Séismes enregistrés ENR et ENT

1. ENR-MOY et ENT-MOY : un facteur d'étalonnage est calculé en rapprochant la moyenne géométrique spectrale des deux composantes au spectre de conception cible UHS (Méthode du code).
2. ENR-IND et ENT-IND : deux facteurs d'étalonnage sont calculés en rapprochant le spectre de réponse de chaque composante de façon individuelle au spectre de conception cible UHS.

4.4.2 Séismes décorrélés H1 et H2

1. H1-MOY et H2-MOY : un facteur d'étalonnage est calculé en rapprochant la moyenne géométrique spectrale des deux composantes au spectre de conception cible UHS.
2. H1-IND et H2-IND : deux facteurs d'étalonnages sont calculés en rapprochant le spectre de réponse majeure à 1.2 x UHS et le spectre mineur à 0.8 x UHS (voir figure 4.7).

4.4.3 Résultats

Les figure B.1 et B.2 en annexe montrent les résultats d'étalonnage pour les séismes enregistrés et décorrélés. Pour chaque système structurel, le paramètre H. geom.1 et H.geom.2 définissent les moyennes géométriques des composantes spectrales étalonnées par les approches 1 et 2 mentionnées précédemment. Ces deux paramètres sont remarquablement très proches pour les séismes ENR et ENT. Avec une erreur de seulement 2%, les deux approches génèrent des accélérogrammes presque identiques. On s'attend à ce que la réponse sismique ne varie pas en fonction de l'approche choisie par l'ingénieur. D'ailleurs, cette prévision est illustrée

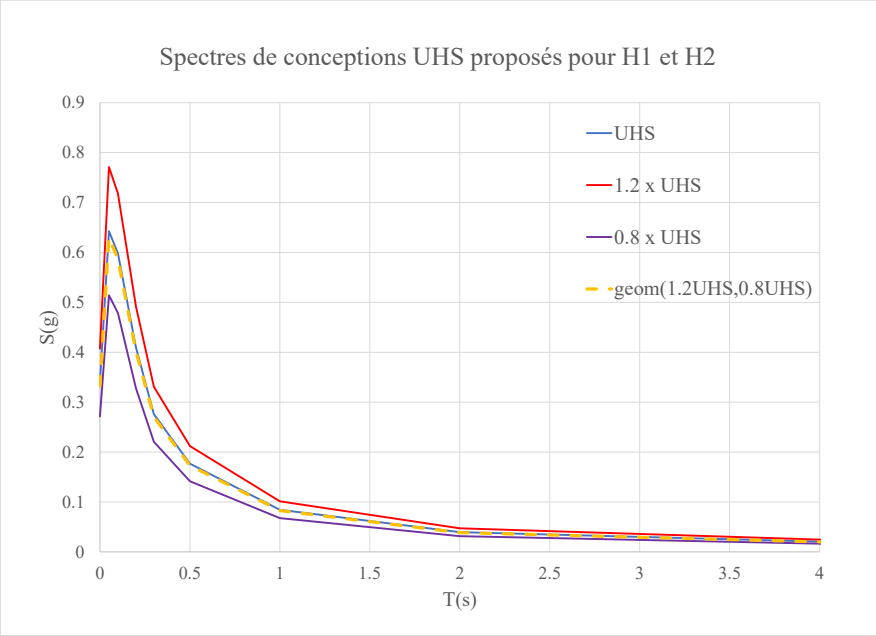

Figure 4.7 Spectres de conceptions pour H1 et H2 (Bouaanani et Bartosh [2])

par quelque exemples de réponse sur les figures C.1 et D.1. Ou on peut remarquer que la demande en déplacement est presque identique sous les deux approches d'étalonnage.

Pour les séismes H1 et H2, c'est apparent que les approches 1 et 2 donnent des résultats très différents. L'utilisation du spectre UHS non modifié induit des résultats non conservateurs erronés. L'erreur de différence entre H. geom.1 et H.geom.2 est d'au moins 20%. Cette dernière est un produit d'inconsistance entre les spectres de réponse H1 et H2 et le spectre de conception UHS.

En se basant sur ces observations, puisque les deux approches d'étalonnages pour les séismes enregistrés aboutissent aux même résultats, l'approche 2 des séismes enregistrés est éliminée pour réduire le nombre d'analyses à effectuer. L'approche 1 des séismes décorrélés est pareillement éliminée à cause de son inconsistance avec la définition du code.

Les sections qui suivent, vont donc être axées sur la différence en demande sismique sous les couples (ENR-MOY , ENT-MOY) et (H1-IND , H2-IND).

4.5 Réponse sismique

4.5.1 Demande en déplacement

Une mesure d'estimation du potentiel du dommage est la demande en déplacement sous l'effet des différentes secousses sismiques étalonnées.

Pour cette étude, une estimation de la demande en déplacement sismique est calculée par analyse temporelle pour tous les modèles sous une paire d'accélérogrammes à la fois enregistrés étalonnés (ENR-MOY et ENT-MOY) et décorrélés étalonnés (H1-IND et H2-IND).

Les figures C.3 à C.7 montrent les résultats des systèmes structuraux à comportement linéaire élastique. Les observations suivantes y sont tirées :

— Courbe de déplacement X-Y : Pour chaque angle thêta, le mouvement de la masse sur le plan X-Y a un comportement similaire pour les systèmes structuraux 1, 2 et 3. À cause de la symétrie de ces systèmes, la direction de la masse change en parallèle avec l'angle d'incidence thêta. Néanmoins, pour les systèmes 4 et 5, ces mouvement ne sont pas analogues. Pour ceux-ci, le déplacement a tendance d'être contrôlé par l'axe fort à fur est à mesure que l'angle thêta d'orientation change. Pour le système 4, les déplacements sont maximisés dans l'axe des X à cause de sa faible rigidité. Contrairement au système 5 qui est plus rigide en X et flexible en Y.

— Déplacements radiaux : les systèmes structuraux 1, 2 et 3 subissent à des déplacements maximums radiaux uniformes et indépendants de l'orientation des accélérogrammes. Alors que pour le système 4 et 5 cette variation est apparente. Cette observation peut être expliquée par l'effet de symétrie.

— Déplacement max et min : il est remarquable que la de demande en déplacement est un paramètre qui dépend de de l'orientation de la secousse sismique. Par exemple, pour le système 1 linéaire-élastique le déplacement de la structure sous les composantes H1 et H2 atteint sa valeurs maximum quand $\theta = 30^o$. Celui-ci augmente de 11.84% comparé à sa valeur en $\theta = 0^o$. Cette logique est valide pour tout les systèmes structuraux sous les séismes enregistrés ou décorrélés.

— Angle d'incidence θ : Si on compare les angles critiques du système 1 et 3. On remarque que les réponses maximum du premier surviennent à 60° et 150° , alors que pour le deuxième, ils sont à 30° et 120°.En général, il s'avère que les angles d'incidences critiques changent d'un système à un autre. On peut dire que l'étalonnage a aussi un effet sur l'angle d'incidence.

— (ENR-MOY et ENT-MOY) vs (H1-IND et H2-IND) : l'étalonnage sur les composantes décorrélées n'est pas toujours conservateur. Par exemple, pour les systèmes 3, 4 et 5

c'est les composantes enregistrées qui maximisent la réponse en déplacement. Particulièrement pour le système 4, le déplacement maximale sous les composantes H1 et H2 est moindre de 22.27% par rapport au déplacement maximale sous les composantes ENR et ENT.

Les figures D.3 à D.7 montrent les résultats des systèmes structuraux à comportement bilinéaire élastique. Les observations suivantes y sont tirées :

— Courbe de déplacement X-Y : Parce que les limites de plasticité varient en fonction de l'angle d'incidence et de la la direction d'analyse, le déplacement de la masse n'est plus similaires pour les systèmes structuraux symétriques. En général, ces mesures ont tendance à se concentrer en deux points différents. En effet, juste après la plastification, le déplacement varie soudainement. Ce comportement est illustré sur la figure 4.8, ou on remarque des plateaux accentués juste au moment de la plastification.

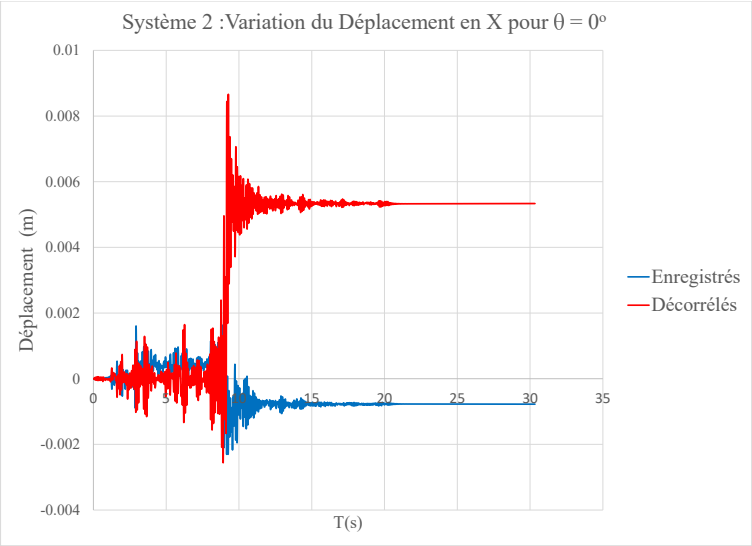

Figure 4.8 Sytème 2 : Variation du déplacements en X pour $\theta = 0^o$

— Déplacements radiaux : Pour tous les systèmes structuraux, les déplacements radiaux varient en fonction de l'angle d'incidence thêta. Ceci est dû au fait que dans les deux directions d'analyses, les limites de plastifications sont différentes. L'effet de la non-symmétrie contribue aussi à cet observation.

— Déplacement max et min : De la même manière que les systèmes linéaires élastiques, La demande en déplacement est une mesure dépendante de l'angle d'incidence.

— Angle d'incidence θ : Les remarques relatives aux angles d'incidences pour les systèmes linéaires élastiques sont aussi valides pour les systèmes bilinéaires plastiques.

— (ENR-MOY et ENT-MOY) vs (H1-IND et H2-IND) : Pareillement, l'étalonnage sur

les composantes décorrélées n'est pas toujours conservateur. Particulièrement pour les cas 1 et 4, la réponse maximale est contrôlée par les séismes enregistrés. Dans le cas du système 4, il est plus élevée de 37.21% . Ceci peut représenter un réel danger.

Pour investiguer un peu plus loin la dépendance aux angles d'orientations sismiques, les composantes horizontales enregistrées (ENR et ENT) ont été modifiés par deux autres méthodes d'étalonnage (Voir figure E.1), soit MSE et PGA. Comme il est possible de voir sur les Annexes F et G, les réponses des systèmes structuraux ont démontré que l'angle d'incidence critique peut varier en fonction de l'étalonnage. Particulièrement pour cette étude, l'angle d'orientation critique varie entre les trois méthodes mentionnées pour les systèmes 4 et 5. Néanmoins, cette observation semble être seulement valide pour les systèmes structuraux asymétriques à comportement bi-linéaires plastiques. De ce fait, plus d'enquêtes sont nécessaires pour généraliser cette conclusion.

4.5.2 Intensité D'Arias

Pour caractériser l'énergie des signaux d'entrées et de sorties, l'intensité d'Arias [IA] est utilisée, telle que :

$I_A = \frac{\Pi}{2g} \int_0^{t_{tot}} (\ddot{u}(t))^2 dt$

$\ddot{u}(t)$ est l'accélération du sol, g et la constante de gravité et t_{tot} est la durée du séisme totale.

Sur les figures C.2 et D.2, les notations suivantes sont utilisées :

- Arias ENR : Énergie de la composante sismique ENR.
- Arias ENT : Énergie de la composante sismique ENT.
- Arias RT : Énergie couplée des composantes ENR et ENT.
- Arias H1 : Énergie de la composante sismique H1.
- Arias H2 : Énergie de la composante sismique H2.
- Arias H1H2 : Énergie couplée des composantes H1 et H2.
- AriasX E : Énergie de réponse sur la direction X sous des séismes enregistrés.
- AriasY E : Énergie de réponse sur la direction Y sous des séismes enregistrés.
- AriasXY E : Énergie de réponse couplée sur les directions X et Y sous des séismes enregistrés
- AriasX D : Énergie de réponse sur la direction X sous des séismes décorrélés.
- AriasY D : Énergie de réponse sur la direction Y sous des séismes décorrélés.
- AriasXY E : Énergie de réponse couplée sur les directions X et Y sous des séismes décorrélés.

Suite aux analyses, il est déduit que l'étalonnage a un effet sur les demandes en énergie. En

effet, des variations sur les demandes sont clairement remarquées. Cependant, l'Arias H1 est un cas particulier, ou ne distingue aucune variation sur la demande sous les effets d'étalonnage, cette observation ne devrait pas être prise en considération. Parce que l'amplitude de ce séisme est très élevée (1,79 g), les 5 cas d'étalonnage ont tendance à réduire le spectre de réponse de la même manière.

Pour la réponse en énergie, les mêmes observations sont retenus pour les systèmes à comportement linéaires élastiques et bilinéaires plastiques. Au premier abord, les réponses sous les séismes décorrélées sont maximisées face aux réponses sous les séismes enregistrés. Comme il peut être déduit des figures C.2 et D.2, la réponse est toujours amplifiée par la directions qui reprend les séismes principaux. Par exemple, quand l'angle d'incidence du séisme est de 0°, l'axe des X reprend 100% de la composante H1 et l'axe des Y reprend 100% de la composante H2, d'où la raison de l'amplification de la mesure d'intensité sur l'axe des X. Plus la composante H1 s'éloigne de l'axe des X moins est la réponse en énergie dans celui-ci.

Pour les systèmes structuraux symétriques, les énergies d'Arias sont constantes en fonction de l'angle d'incidence thêta. Ce point mérite d'être souligné, comme cela implique que l'intensité d'Arias couplée est une mesure indépendante de l'orientation des secousses appliquées. Cependant, cette implication ne devient plus valide pour les systèmes asymétriques, ou on remarque des variations en fonction de l'orientation. Bien que cette conclusion reste ambiguë, une des théories pouvant expliquer cette remarque serait l'effet de torsion et de distribution des paramètres dynamiques tel que la rigidité en plan. Pour généraliser cette dernière, il serait nécessaire d'étudier en profondeur l'effet de sélection et d'étalonnage sur la demande en énergie.

4.6 Sélection des secousses sismiques

Les études mentionnées ci-haut ne sont pas suffisant pour généraliser des conclusions. Afin d'enquêter en profondeur la réponse d'une structure sous chargement bidirectionnelle, une deuxième étude doit être menée avec un ensemble de mouvement du sol approprié. Bien évidemment, non seulement l'effet d'étalonnage doit être pris en compte, mais également celui de sélection. Dans cette section, nous souhaitons démontrer la variabilité au niveau de sélection des secousses sismiques en utilisant l'outil de calcul.

La base de données utilisée est composée des évènements sismiques historiques. Au total, 132 accélérogrammes horizontaux sont utilisés pour cette étude. Les magnitudes MW et les distances épicentrales R sont comprises entre [4 6.8] M et [2.4 640.4] km, respectivement (voir figure 4.9). Compte tenu de sa grandeur, aucune pré-sélection n'est effectuée. Malgré la

non-disposition de nombreux enregistrements sismiques, la base de données est nettoyée des enregistrements erronés ou non conventionnels (voire figure 4.10). Notamment, ceux affectés par des erreurs instrumentales.

Tableau 4.2 Caractéristiques de la base des données historique

Évènement	Mw	Nb.d'enregistrements	Type du Sol
Miramichi (1982)	5.7	10	Mou
Nahanni (1985)	6.0	8	Rocheux
Saguenay (1988)	5.9	14	Rocheux
Cap-Rouge (1997)	5.1	14	Rocheux
Pymatuning (1998)	5.4	2	Rocheux
Côte-Nord (1999)	5.1	18	Roheux
Au-Sable-Forks (2002)	5.5	26	Rocheux
Rivière-du-Loup (2005)	5.4	16	Rocheux
Val-Des-Bois (2010)	5.0	18	Mou/Rocheux

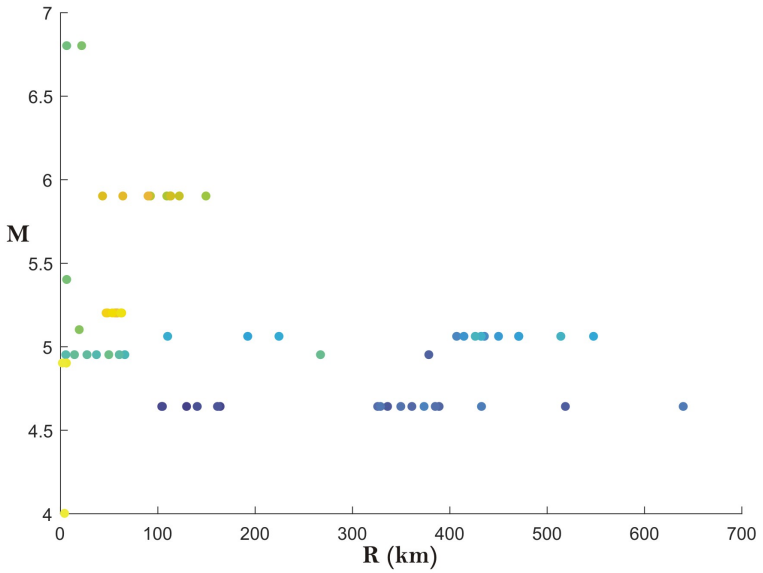

Figure 4.9 Magnitudes et distances épicentrales enregistrés

CNB 2015 : Selon la figure H.1, il est remarqué que le spectre de réponse moyen est toujours supérieure a celui de conception cible. bien que cette méthode soit conservatrice, le paramètre de raffinement (écart-type) utilisée par celle-ci peut augmenter la variabilité au niveau des spectres de réponses sélectionnés. Par exemple, pour le système structurel 3, les moyennes géométriques 9 et 10 devraient être rejetées. Celles-ci correspondent à des séismes d'amplitude

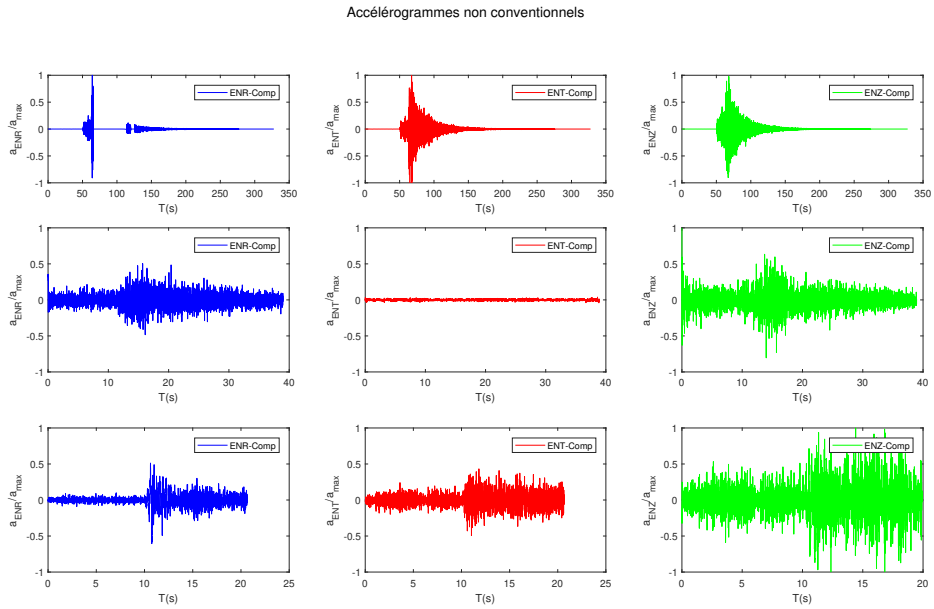

Figure 4.10 Enregistrements sismiques erronés rejetés de la base de données historiques

faible, soit Nahanni et Miramichi, qui ont été étalonnés excessivement. Pareillement pour le système 5, les accélérogrammes (Miramichi) correspondant à la moyenne géométrique 10 devraient être remplacés par une autre paire. Un jugement supplémentaire est requis de la part de l'ingénieur pour sélectionner un ensemble d'accélérogrammes appropriés. Les traces des séismes de Nahanni et de Miramichi sont sur la figure 4.11.

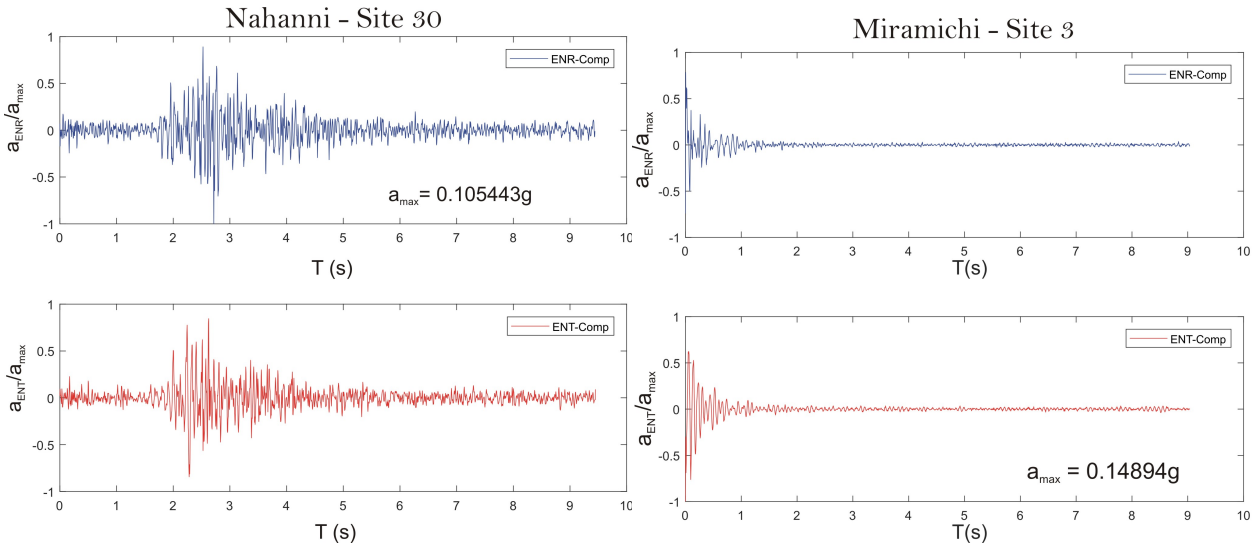

Figure 4.11 Enregistrements sismiques correspondant aux moyennes géométriques 9 et 10

PGA : La méthode PGA est beaucoup moins conservatrice que le CNB 2015. Puisque la sélection peut être aléatoire, un nsemble des séismes a été premièrement sélectionné en minimisant la facteur d'étalonnage. Ensuite un deuxième ensemble est sélectionné en minimisant le paramètre de raffinement SSE. Comme présentée sur la figure H.2, le premier peut être utilisé pour des structures à courtes périodes, ou le spectre de réponse moyen est généralement supérieure au spectre cible. En revanche, le deuxième ensemble peut être utilisé pour des structures à longues période, ou le spectre de réponse moyen est aussi supérieure. Généralement, par rapport la méthode CNB 2015, plus de variabilité est remarquée au niveau des moyennes géométriques étalonnées.

4.7 Conclusions

Cette section présente un exemple d'utilisation de l'outil axé sur l'étalonnage des secousses sismiques bidirectionnelles est élaboré. Particulièrement pour cette étude, l'outil a été utilisé pour générer deux paires d'accélérogrammes étalonnés. Le premier couple consiste à des accélérogrammes enregistrés étalonnés sur une moyenne géométrique spectrale. Le deuxième, comprend des accélérogrammes décorrélés étalonnés sur deux spectres de conception modifiés (Bouaanani et Bartosh [2]). En examinant la réponse de plusieurs modèles structuraux sous l'effet de ces deux séismes, les conclusions suivantes sont retenues.

1. L'application des séismes décorrélés peut sous-estimer la réponse maximale en déplacement.
2. L'application des séismes décorrélés maximise toujours la demande en énergie.
3. L'intensité d'Arias couplée ne dépend pas de l'angle d'incidence θ quand le système est symétrique. Pour les systèmes asymétriques sensibles aux effets de la torsion, celle-ci devient dépendante de l'angle d'incidence.
4. L'étalonnage a des effets sur l'angle d'incidence θ, sur la réponse en amplitude (déplacement) et la réponse en énergie. Cela implique qu'il serait important de prendre en compte les trois paramètres lors de la conception des structures sujettes aux séismes importants.

Pour étudier la pertinence de ces résultats, une étude approfondie est nécessaire pour réduire la variabilité et augmenter la fiabilité. Suite à ces observations, il serait recommander d'utiliser un nombre de séismes appropriés pour étudier l'effet couplé de l'étalonnage et de l'orientation des séismes (décorrélés et enregistrés) sur la réponse en amplitude et en énergie. Les paramètres de raffinement pour sélection des secousses sismiques peuvent aussi avoir un impact sur la réponse structurelle. En examinant les méthodes CNB2015 et PGA, les conclusions suivantes sont retenues.

1. Le paramètre de raffinement (écart type) proposé par le CNB 2015, peut augmenter la variabilité au niveau des moyennes géométriques sélectionnées.
2. Pour la méthode PGA, la sélection d'accélérogrammes ayant des PGA proche au celui du spectre cible devrait être utilisée seulement pour des structures à courtes périodes de vibrations.
3. Le paramètre de raffinement (SSE), permet une approximation de réponse adéquate pour les structures ayant des longues périodes de vibrations.
4. L'ingénieur ne devrait pas se fier à 100% aux paramètres de raffinements proposés par chaque méthode. Un jugement de la part de celui-ci peut être nécessaire à la sélection finale d'un ensemble d'accélérogrammes appropriés.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

5.1 Synthèse des travauxs

Le manque d'outils disponibles pour l'étalonnage des séismes au Canada a motivé la conception d'un outil informatique interactif spécialisé dans ce domaine. L'outil développé permet d'étalonner des spectres de réponses d'un ensemble de séismes sélectionnés aux spectres de conception cible selon diverses approches, incluant celle préconisée par Le Code national du bâtiment (CNB 2015) [21] et Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CSA S6-14) [61]. L'outil a été programmée sous le langage MATLAB [5] et de manière à être conviviale d'utilisation. Il peut être utilisé pour appliquer et comparer six méthodes d'étalonnage. L'interface graphique de l'outil développé permet d'acquisitionner des informations sur le type d'analyse, les périodes de vibration de la structure et les plages d'intérêt, le spectre de conception cible, le nombre d'accélérogrammes requis, etc.

Dans ce mémoire, diverses caractéristiques et fonctionnalités de l'outil sont expliquées en détail en fournissant quelques exemples d'applications. La vérification et le débogage du programme a été réalisé en fournissant les sollicitations sismiques requises dans le cadre de plusieurs projets de recherches, en particulier pour l'évaluation des ponts isolés sismiquement en tenant compte des effets des basses températures, l'étude de la réponse sismique bidirectionnelle des piliers de pont, et l'évaluation de l'effet du choix de l'approche d'étalonnage et de la décorrélation sur la réponse sismique bidirectionnelle. Ce dernier projet a été réalisé par l'auteur et a conduit aux conclusions suivantes :

1. L'étalonnage à des effets sur l'angle d'incidence, la réponse en amplitude et la réponse en énergie. Ces trois paramètres devraient être prises en compte lors de la conception des structures sujettes aux séismes importants.
2. L'application des séismes décorrélés peut sous-estimer la réponse maximale en amplitude.

Ces projets ont démontré l'efficacité de l'outil et surtout sa grande utilité dans un contexte où l'ingénieur a régulièrement besoin de tester rapidement plusieurs hypothèses de ses analyses.

5.2 Améliorations futures

Bien que l'outil developpé soit assez mature pour être utilisé dans la pratique, les perspectives d'amélioration suivante sont à explorées :

1. Intégrer des méthodes d'ajustement temporelles (Spectral-matching).
2. Incorporer une base de séismes simulés et historiques permettant d'accélérer la sélection des accélérogrammes appropriés.
3. Ajouter un module de correction et de filtrage des séismes.
4. Ajouter un module de calcul des intensités de mesures (intensité d'Arias, Vitesse absolue cumulative CAV, Accélération de pointe effective, etc.).

RÉFÉRENCES

[1] F. Vandal, *Conception et évaluation des ponts isolés sismiquement au Québec en tenant compte des effets des basses températures*, Montréal, Qc, 2018. [En ligne]. Disponible : https://publications.polymtl.ca/3302/

[2] N. Bouaanani et I. Bartosh, "Correlations of multi-component ground motions in eastern canada," dans *Proceeding 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec, Q , Canada*, 2019.

[3] R. Riddell et J. Llera, "Seismic analysis and design : Current practice and future trends," dans *Proc. of 11th World Conf. on Earthquake Engng., Acapulco, Mexico, Paper*, n°. 2010, 1996, p. 1–12.

[4] L. Lin *et al.*, "Selection of seismic excitations for nonlinear analysis of reinforced concrete frame buildings," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 40, n°. 5, p. 411–426, 2012.

[5] MathWorks, "Matlab r2017b, the language of technical computing." [En ligne]. Disponible : https://fr.mathworks.com/products/matlab.html

[6] R. Mitchell, D. Tinawi, *Earthquake risk in Canada : key factors to consider.* Canada, Toronto : Swiss Re Canada, 1995.

[7] Ressources Naturelles Canada, Consulté sur : http ://www.seismescanada.rncan.gc.ca/zones/index-fr.php, 2016.

[8] J. Cassidy *et al.*, "Canada's earthquakes :'the good, the bad, and the ugly'," *Geoscience Canada*, vol. 37, n°. 1, 2010.

[9] A. Palmstrom, "Rmi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes," *Ph.D. thesis Univ*, 1995. [En ligne]. Disponible : http://www.rockmass.net

[10] A. Filiatraut *et al.*, *Elements of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3e éd. Québec,CA : Presses internationals Polytechnique, 2013.

[11] C. E. Ventura *et al.*, "Subduction ground motions characterization and their relation to potential structural damage," dans *Proceeding 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec, QC, Canada*, 2019.

[12] Cascadia Region Earthquake Workshop (CREW), "Cascadia shallow earthquakes." [En ligne]. Disponible : https://crew.org/wp-content/uploads/2016/04/crew-shallow-final-2009.pdf

[13] K. L. Nourse, *Cascadia Subduction zone Earthquakes : A magnitude 9.0 Earthquake Scenario*, 2013. [En ligne]. Disponible : https://crew.org/wp-content/uploads/2016/04/cascadia_subduction_scenario_2013.pdf

[14] O. W. Nuttli, "Similarities and differences between western and eastern united states earthquakes, and their consequences for earthquake engineering," dans *Proceedings of the Conference on Earthquakes and Earthquake Engineering : the Eastern United States*, vol. 1, 1981, p. 25–27.

[15] G. M. Atkinson et D. M. Boore, "Modifications to existing ground-motion prediction equations in light of new data," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 101, n°. 3, p. 1121–1135, 2011.

[16] D. Weichert *et al.*, "Strong motion records from the 23 december 1985," 1986.

[17] R. Horner et R. Lamontagne, M. Wetmiller, *Les séismes de la Nahanni en 1985 dans les T*, N.-O. Consulté sur, 2016. [En ligne]. Disponible : http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/historic-historique/events/19851223-fr.php

[18] G. M. Atkinson, "Earthquake time histories compatible with the 2005 national building code of canada uniform hazard spectrum," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 36, n°. 6, p. 991–1000, 2009.

[19] R. Tremblay *et al.*, "Selection and scaling of ground motion time histories for seismic analysis using nbcc 2015," dans *Proceeding 11th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Victoria, BC, Canada, Paper no*, vol. 99060, 2015.

[20] E. Kalkan et A. K. Chopra, "Practical guidelines to select and scale earthquake records for nonlinear response history analysis of structures," *US geological survey open-file report*, vol. 1068, n°. 2010, p. 126, 2010.

[21] NBCC, "National building code of canada," 2015.

[22] S. Koboevic *et al.*, "Selection and scaling of nbcc 2005 compatible simulated ground motions for nonlinear seismic analysis of low-rise steel building structures," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 38, n°. 12, p. 1391–1403, 2011.

[23] J. M. Nau et W. J. Hall, "Scaling methods for earthquake response spectra," *Journal of Structural Engineering*, vol. 110, n°. 7, p. 1533–1548, 1984.

[24] A. Nassar et H. Krawinkler, "Seismic demands for sdof and mdof systems, john a," *Blume. Earthq. Eng. Center., Report*, vol. 95, 1991.

[25] E. Miranda, "Site-dependent strength-reduction factors," *Journal of Structural Engineering*, vol. 119, n°. 12, p. 3503–3519, 1993.

[26] N. Shome et C. A. Cornell, “Normalization and scaling accelerograms for nonlinear structural analysis,” dans *Proceedings of the 6th US National Conference on Earthquake Engineering*. Seattle, 1998, p. 1–12.

[27] Y. Kurama et K. Farrow, “Ground motion scaling methods for different site conditions and structure characteristics,” *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 32, n°. 15, p. 2425–2450, 2003.

[28] V. Graizer et E. Kalkan, “Prediction of spectral acceleration response ordinates based on pga attenuation,” *Earthquake Spectra*, vol. 25, n°. 1, p. 39–69, 2009.

[29] P. Dominique, *Évaluation probabiliste de l’aléa sismique : état de l’art*. Rap. BRGM, 1999.

[30] T. Little, *The Canadian Society for Civil Engineering Vancouver Section*. Vancouver, BC : Communication présentée au Nom du CSCE/ SCGC, 2008.

[31] J. W. Baker, “Identification of near-fault velocity pulses and prediction of resulting response spectra,” dans *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, 2008, p. 1–10.

[32] Y. M. Fahjan, F. İ. Kara et A. Mert, “Selection and scaling time history records for performance-based design,” dans *Performance-Based Seismic Design of Concrete Structures and Infrastructures*. IGI Global, 2017, p. 1–35.

[33] J. W. Baker, “An introduction to probabilistic seismic hazard analysis (psha),” *White paper, version*, vol. 1, p. 72, 2008.

[34] C. B. Haselton *et al.*, “Response history analysis for the design of new buildings in the nehrp provisions and asce/sei 7 standard : Part i-overview and specification of ground motions,” *Earthquake Spectra*, vol. 33, n°. 2, p. 373–395, 2017.

[35] R. B. Zimmerman *et al.*, “Response history analysis for the design of new buildings in the nehrp provisions and asce/sei 7 standard : Part iii-example applications illustrating the recommended methodology,” *Earthquake Spectra*, vol. 33, n°. 2, p. 419–447, 2017.

[36] FEMA, “Seismic performance assesment of buildings, fema p-58, prepared by the applied technology council for the federal emergency management agency,” 2012.

[37] Pacific Earthquake Engineering Reaserch (PEER), *Technical report for the PEER ground motion database web application*, 2018. [En ligne]. Disponible : https://ngawest2.berkeley.edu/Technical_Report.pdf

[38] S. Mazzoni, M. Hachem et M. Sinclair, “An improved approach for ground motion suite selection and modification for use in response history analysis,” dans *15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa*, 2012.

[39] L. H. Najafi et M. Tehranizadeh, “Ground motion selection and scaling in practice,” *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 59, n°. 2, p. 233–248, 2015.

[40] D. Michaud et P. Léger, “Ground motions selection and scaling for nonlinear dynamic analysis of structures located in eastern north america,” *Canadian journal of civil engineering*, vol. 41, n°. 3, p. 232–244, 2014.

[41] M. Dehghani et R. Tremblay, “Robust period-independent ground motion selection and scaling for effective seismic design and assessment,” *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 20, n°. 2, p. 185–218, 2016.

[42] J. J. Bommer et A. B. Acevedo, “The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis,” *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 8, n°. spec01, p. 43–91, 2004.

[43] N. A. Abrahamson, “Statistical properties of peak ground accelerations recorded by the smart 1 array,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 78, n°. 1, p. 26–41, 1988.

[44] F. Naeim, A. Alimoradi et S. Pezeshk, “Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms,” *Earthquake spectra*, vol. 20, n°. 2, p. 413–426, 2004.

[45] A. Kottke et E. M. Rathje, “A semi-automated procedure for selecting and scaling recorded earthquake motions for dynamic analysis,” *Earthquake Spectra*, vol. 24, n°. 4, p. 911–932, 2008.

[46] N. Jayaram, T. Lin et J. W. Baker, “A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance,” *Earthquake Spectra*, vol. 27, n°. 3, p. 797–815, 2011.

[47] B. A. Bradley, “A ground motion selection algorithm based on the generalized conditional intensity measure approach,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 40, p. 48–61, 2012.

[48] J. Penzien et M. Watabe, “Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions,” *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 3, n°. 4, p. 365–373, 1974.

[49] K. Kostinakis, A. Athanatopoulou et I. Avramidis, “Orientation effects of horizontal seismic components on longitudinal reinforcement in r/c frame elements,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 12, n°. 1, p. 1–10, 2012.

[50] N. Bouaanani, “Stochastic decorrelation of 3d ground motions typical of eastern north america, document interne du grs.”

[51] B. Blasco, *Caractérisation des secousses sismiques typiques de L’EST canadien*, Montréal, Qc, 2009. [En ligne]. Disponible : https://publications.polymtl.ca/194/

[52] D. N. Grant, “Response spectral matching of two horizontal ground-motion components,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 137, n°. 3, p. 289–297, 2010.

[53] B. Wei, C. Li et X. He, “The applicability of different earthquake intensity measures to the seismic vulnerability of a high-speed railway continuous bridge,” *International Journal of Civil Engineering*, vol. 17, n°. 7, p. 981–997, 2019.

[54] M. Hariri-Ardebili et V. Saouma, “Probabilistic seismic demand model and optimal intensity measure for concrete dams,” *Structural Safety*, vol. 59, p. 67–85, 2016.

[55] J. W. Baker et C. A. Cornell, “Which spectral acceleration are you using ?” *Earthquake Spectra*, vol. 22, n°. 2, p. 293–312, 2006.

[56] A. Whittaker *et al.*, “Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses,” Rapport technique, 2011.

[57] D. M. Boore, J. Watson-Lamprey et N. A. Abrahamson, “Orientation-independent measures of ground motion,” *Bulletin of the seismological Society of America*, vol. 96, n°. 4A, p. 1502–1511, 2006.

[58] N. Bouaanani, *Utilitaire pour le calcul des spectres sismiques, Département des génies Civils, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal*, Montréal, QC, 2005.

[59] M. H. Asselin, “Réponse sismique bidirectionnelle des piliers de pont au québec,” 2020, en cours.

[60] Computer and Structures (Csi), *CSi Analysis Reference Manual*, California, USA, 2016.

[61] CSA S6-14, “Canadian highway bridge design code,” 2014.

ANNEXE A ORGANIGRAMMEES DES MÉTHODES DE CALUL IMPLÉMENTÉS DANS L'OUTIL DE CALCUL

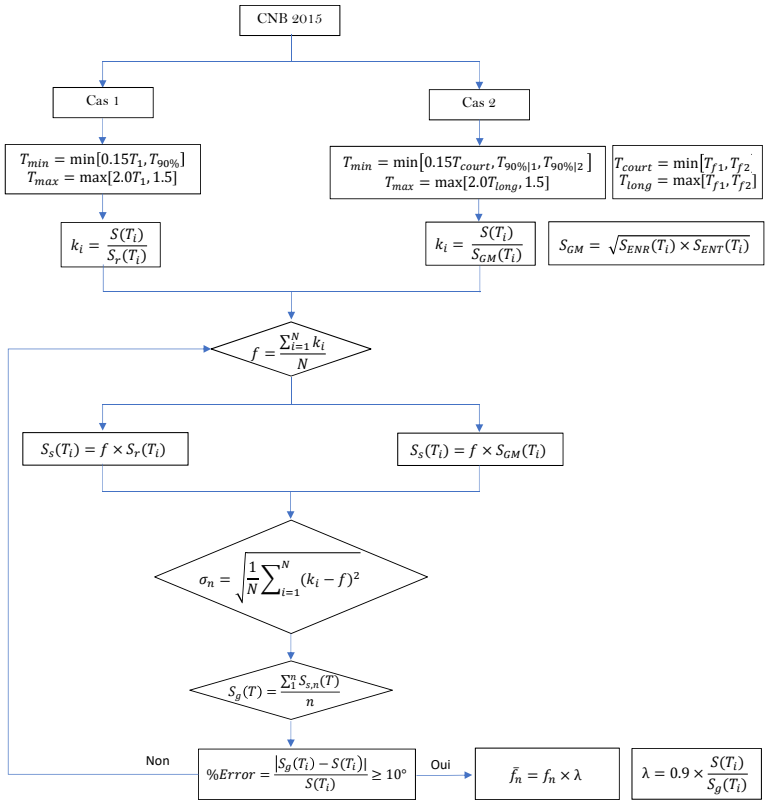

Figure A.1 Organigramme détaillé de la méthode du CNB2015

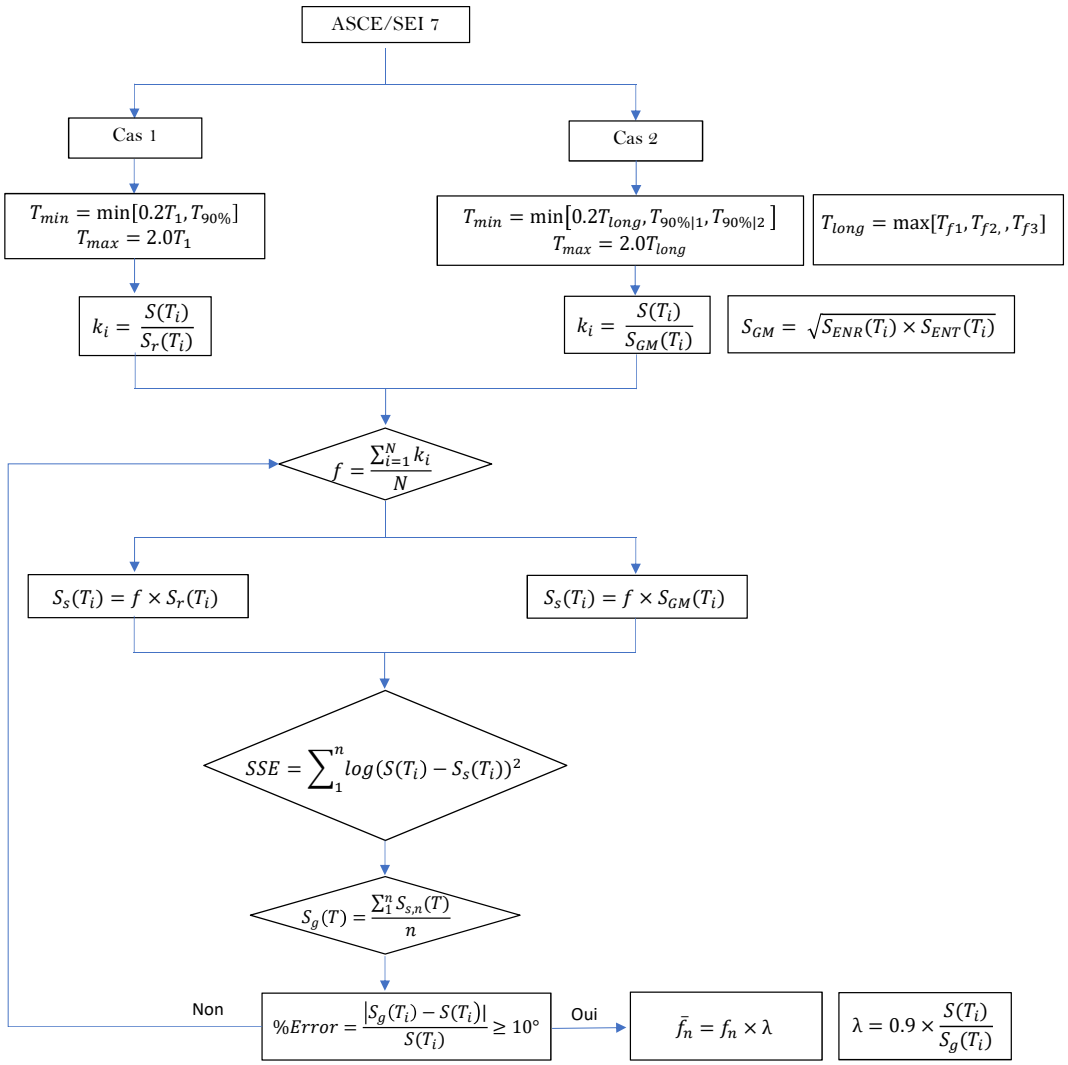

Figure A.2 Organigramme détaillé de la méthode du ASCE/SEI 7

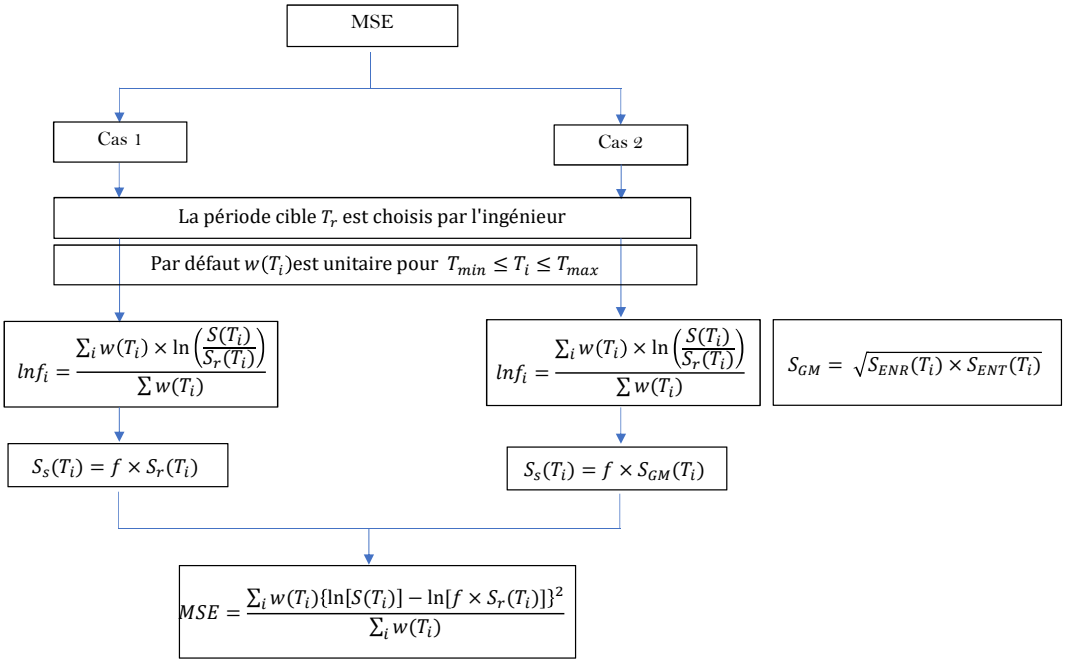

Figure A.3 Organigramme détaillé de la méthode MSE

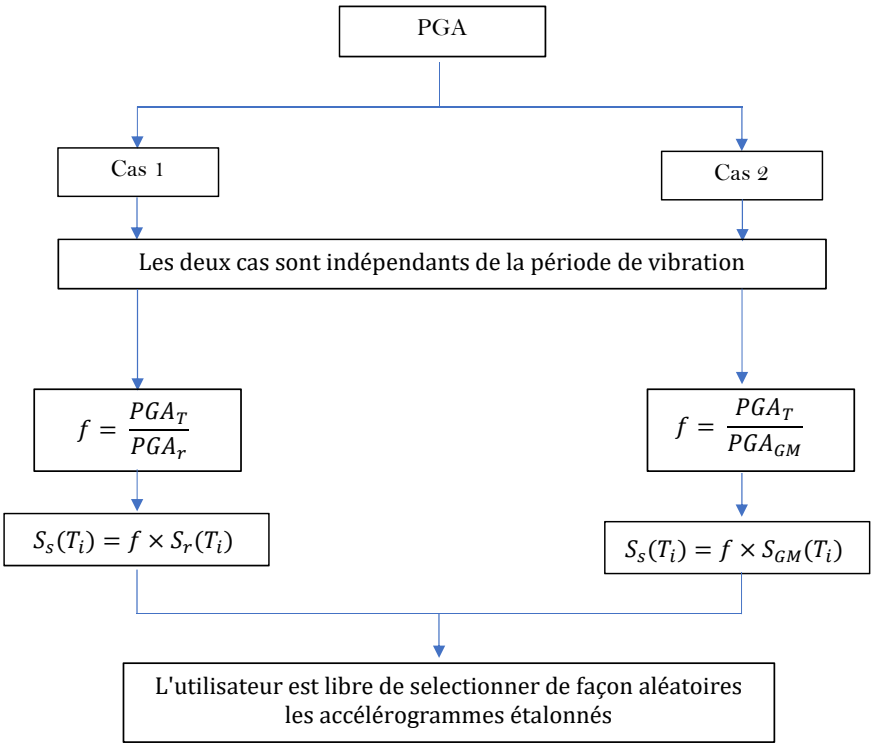

Figure A.4 Organigramme détaillé de la méthode PGA

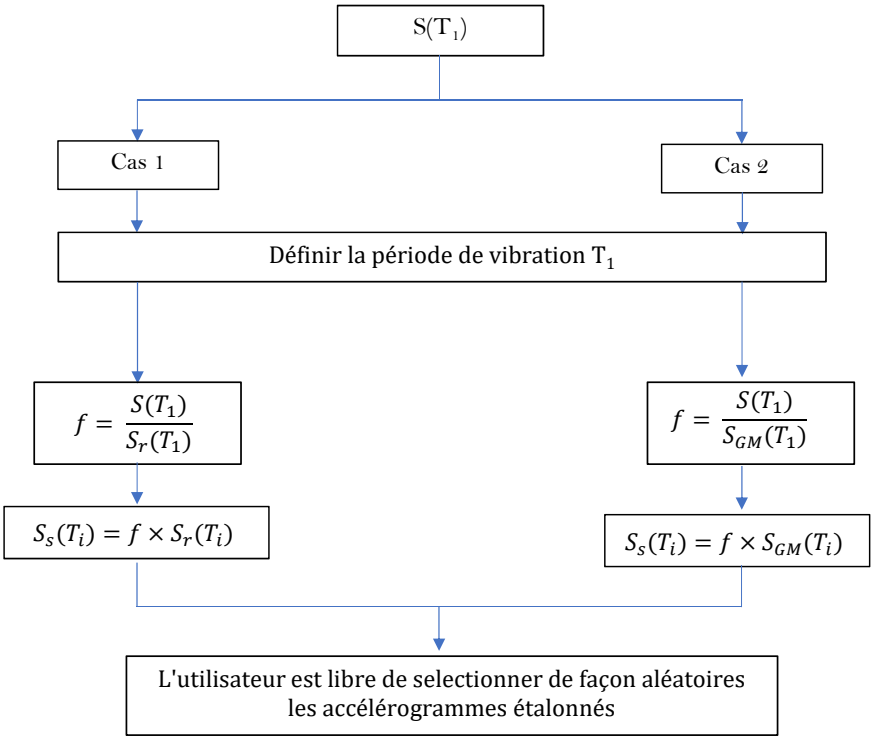

Figure A.5 Organigramme détaillé de la méthode $S(T_1)$

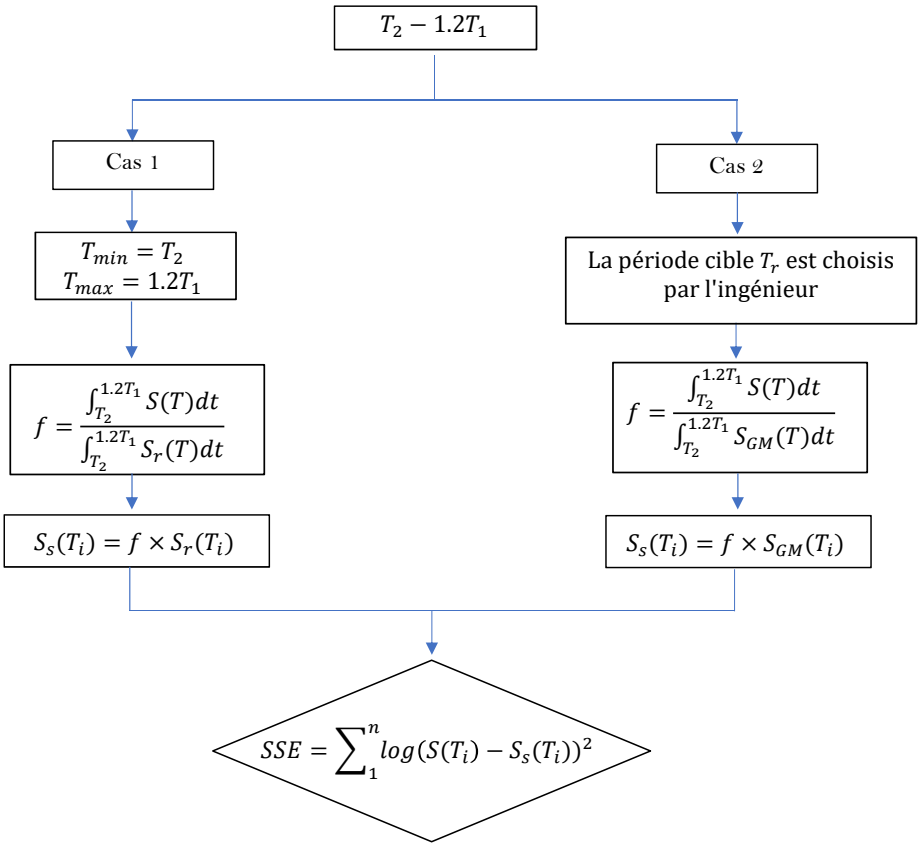

Figure A.6 Organigramme détaillé de la méthode T_2-$1.2T_1$

ANNEXE B SPECTRES DE RÉPONSES DES ACCÉLÉROGRAMMES ENREGISTRÉS ET DÉCORRÉLÉS ÉTALONNÉS PAR LA MÉTHODE CNB 2015

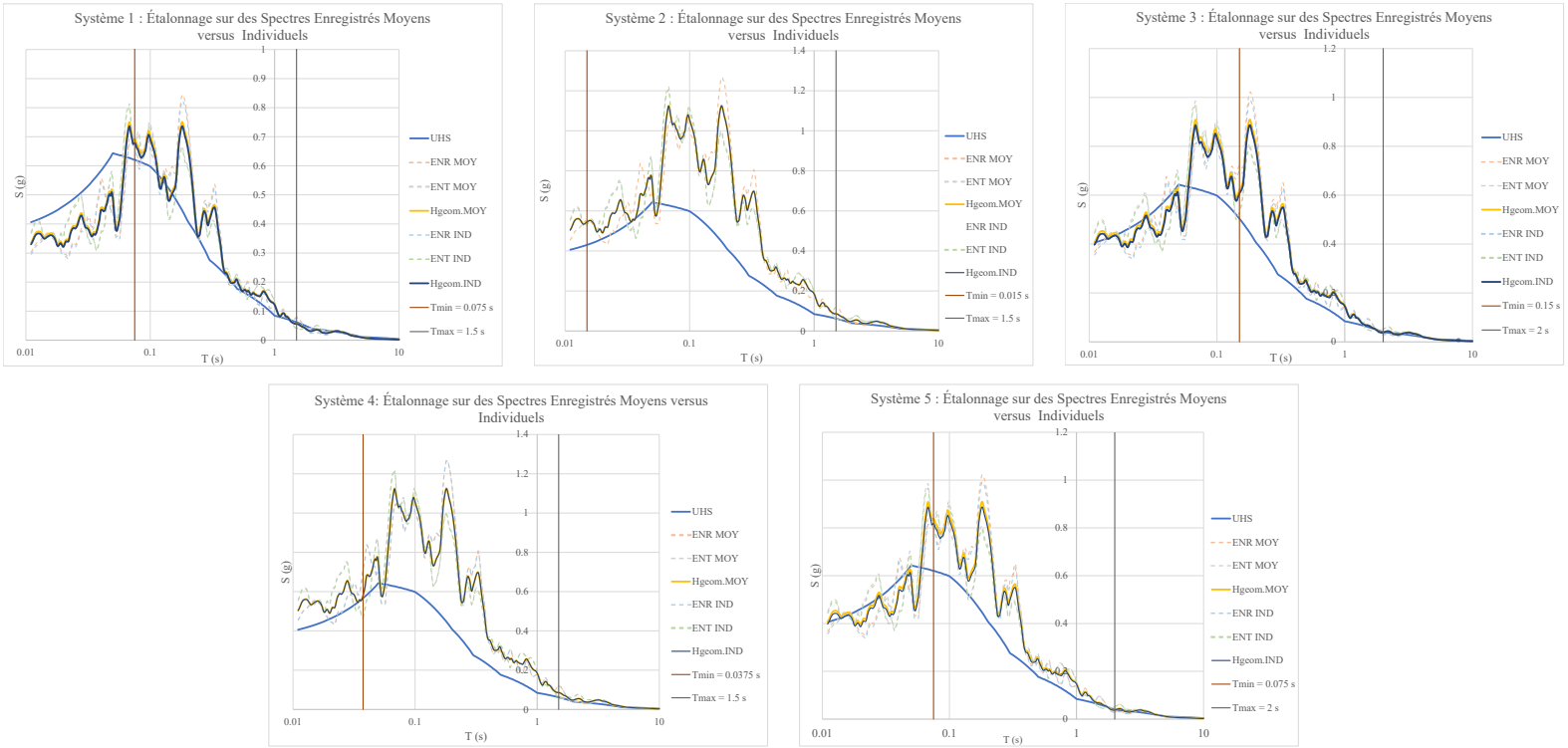

Figure B.1 Étude de cas : Spectres de réponses ENR et ENT étalonnés

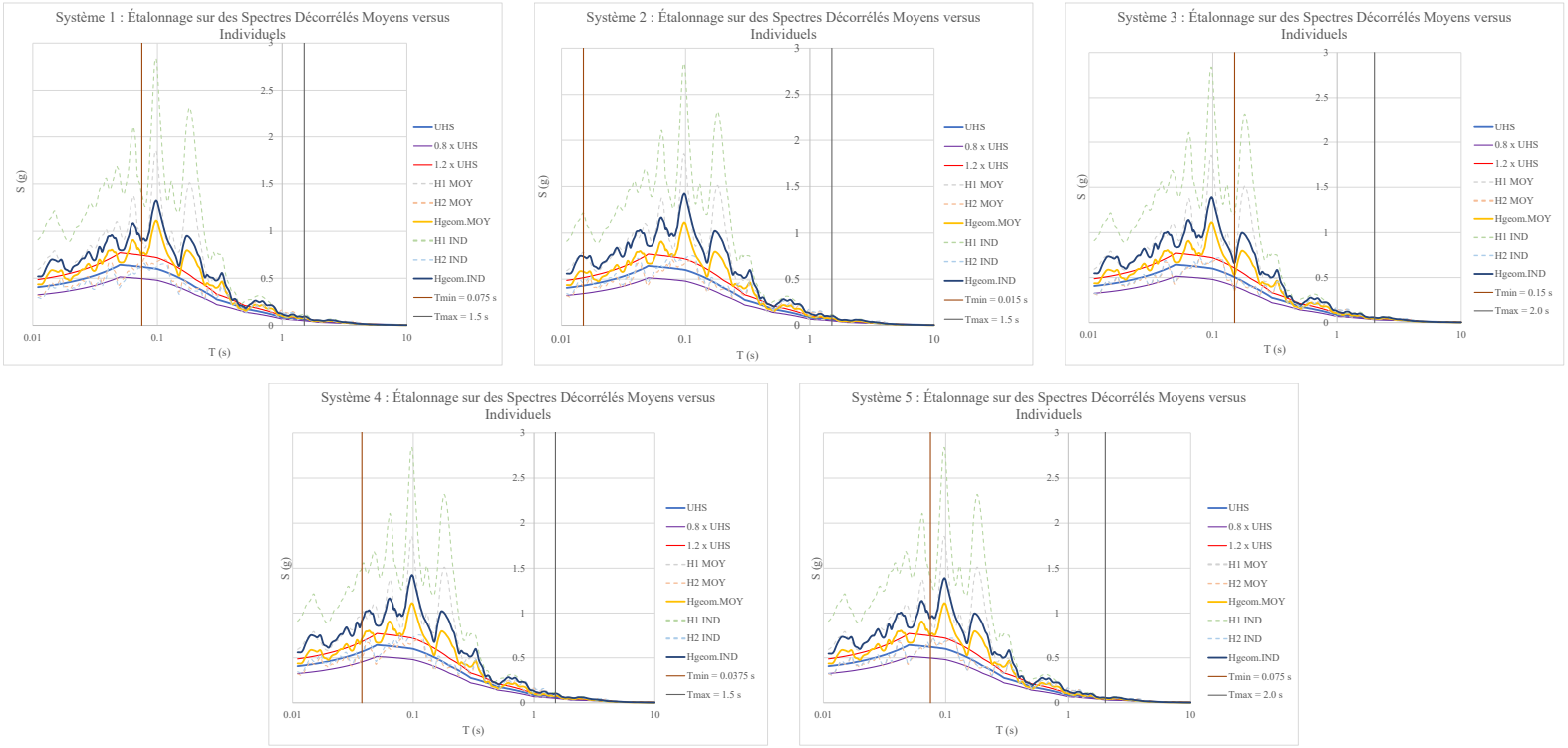

Figure B.2 Étude de cas : Spectres de réponses H1 et H2 étalonnés

ANNEXE C COMPORTEMENT LINÉAIRE ÉLASTIQUE : RÉPONSE SOUS LES COMPOSANTES HORIZONTALES

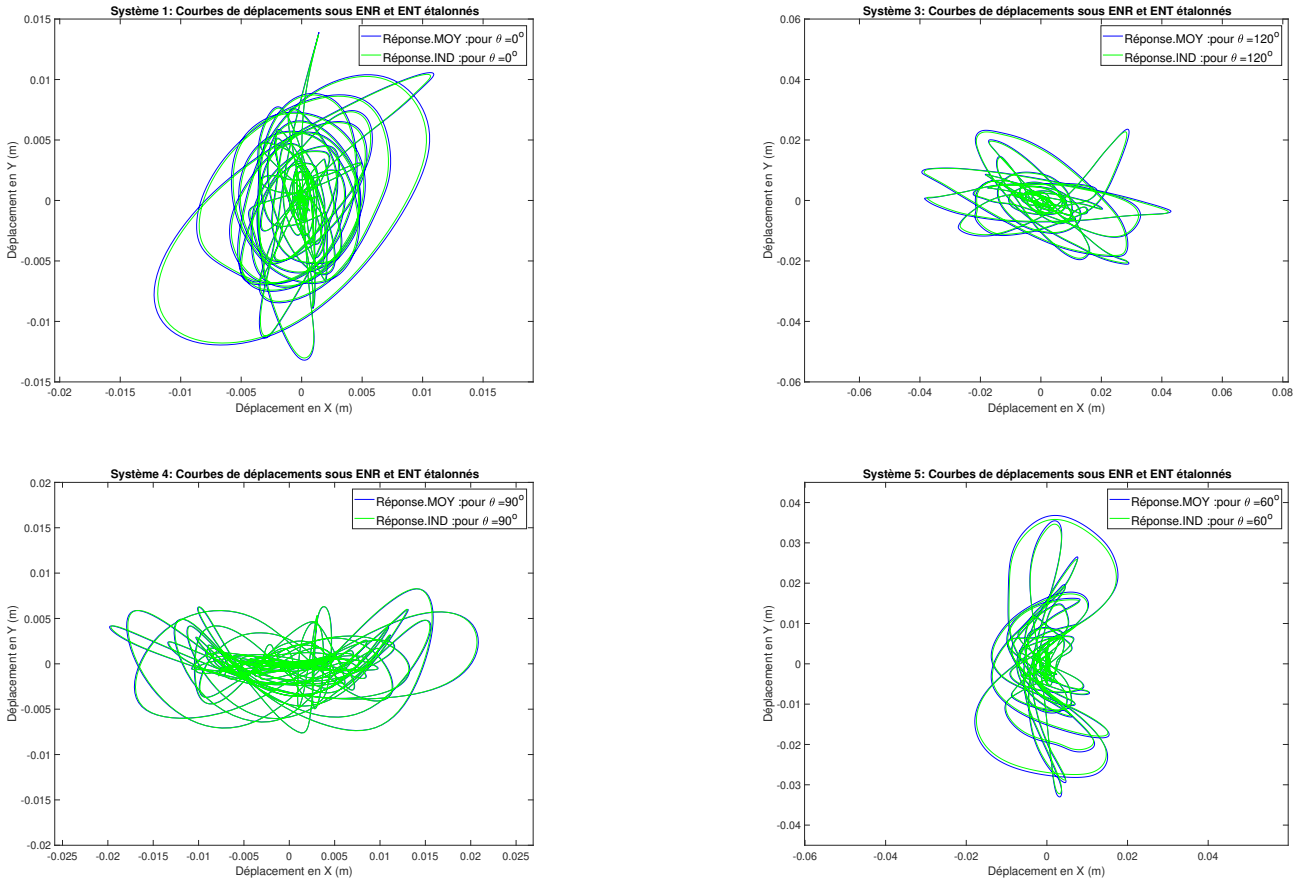

Figure C.1 Comportement linéaire élastique : Exemples de réponses sous des composantes spectrales enregistrés (ENR.MOY,ENT.MOY) et (ENR.IND,ENT.IND)

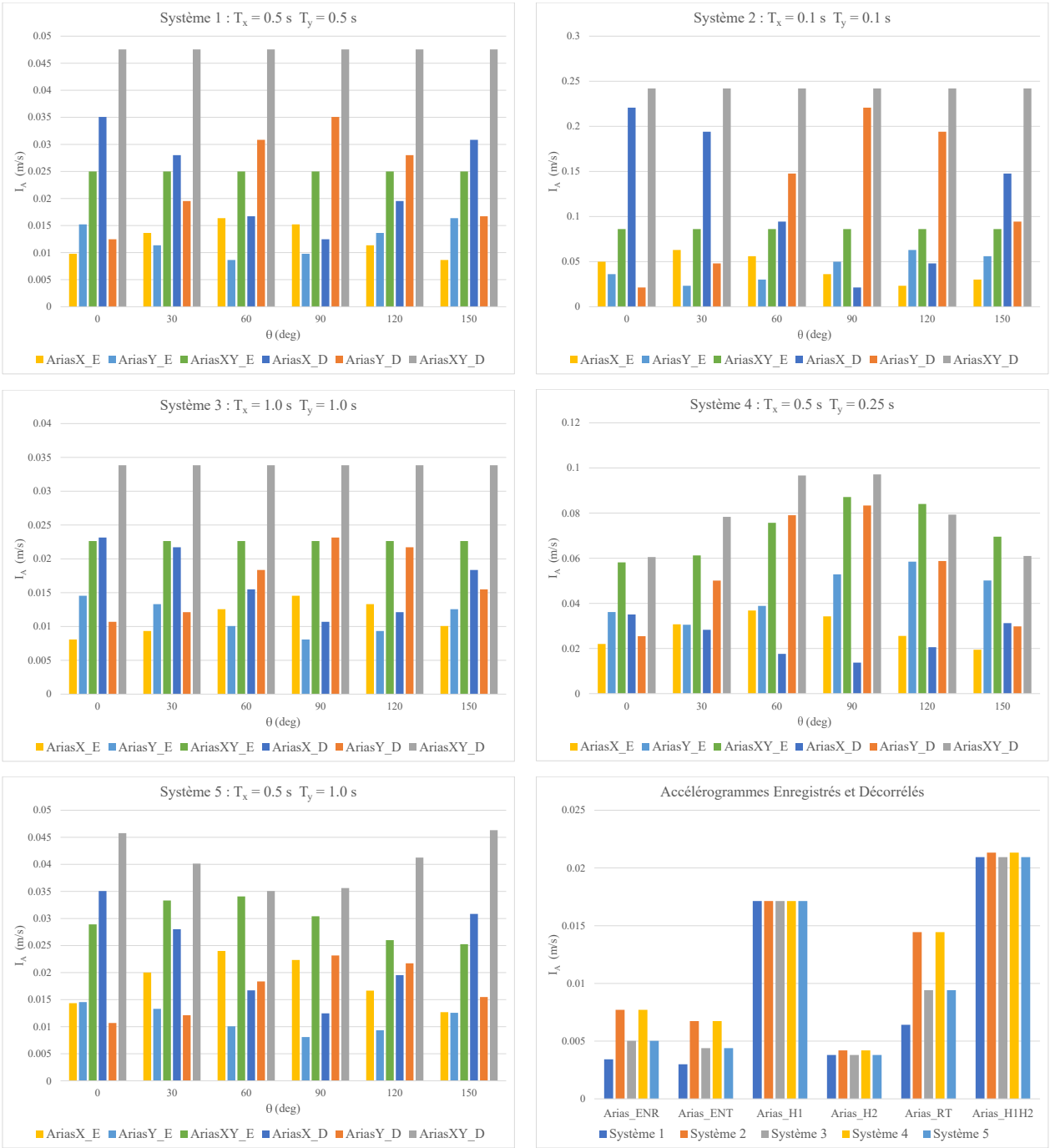

Figure C.2 Intensités d'Arias des accélérogrammes et des réponses en accélérations

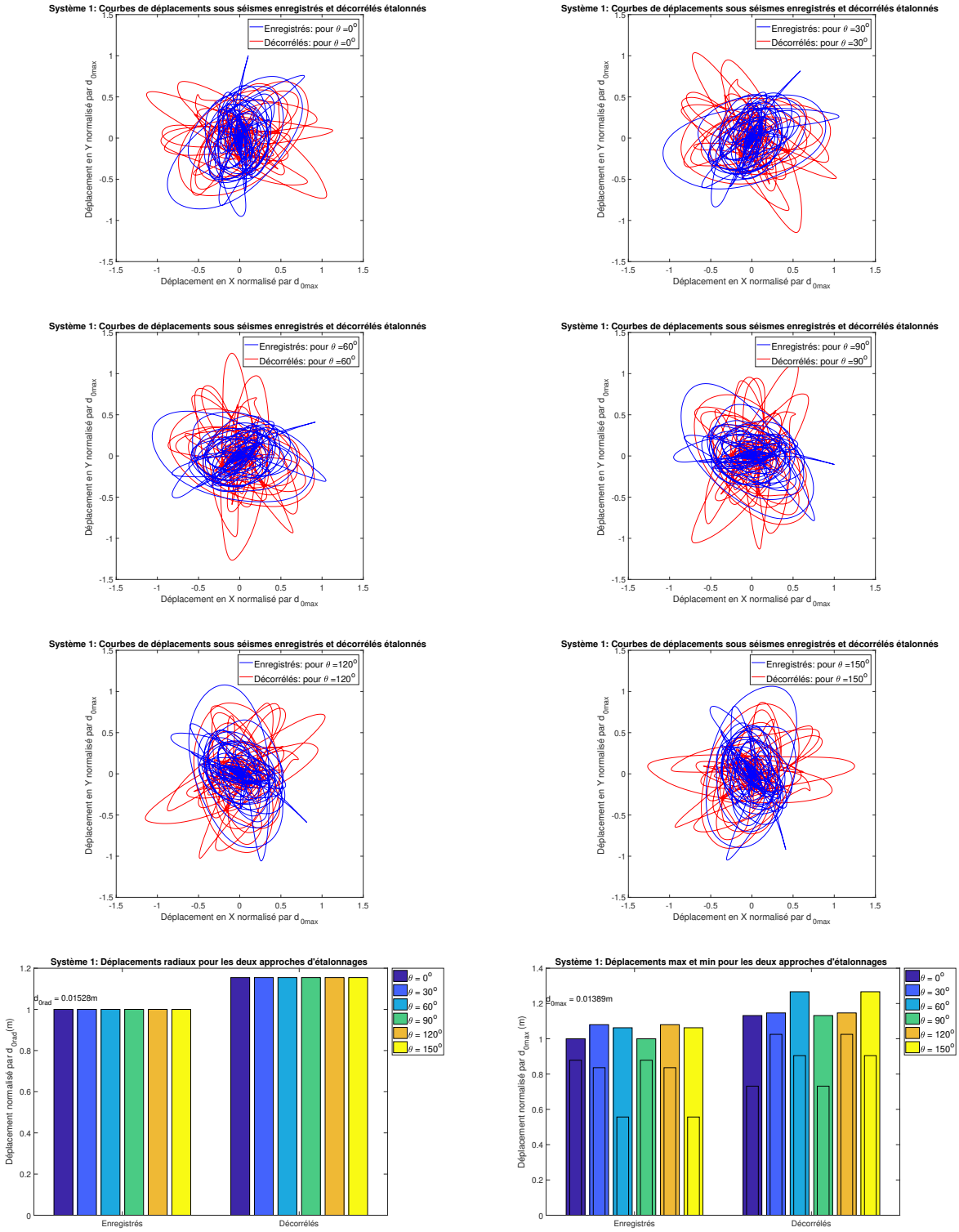

Figure C.3 Système structurel 1 T_x= 0.5 s, T_y= 0.5 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

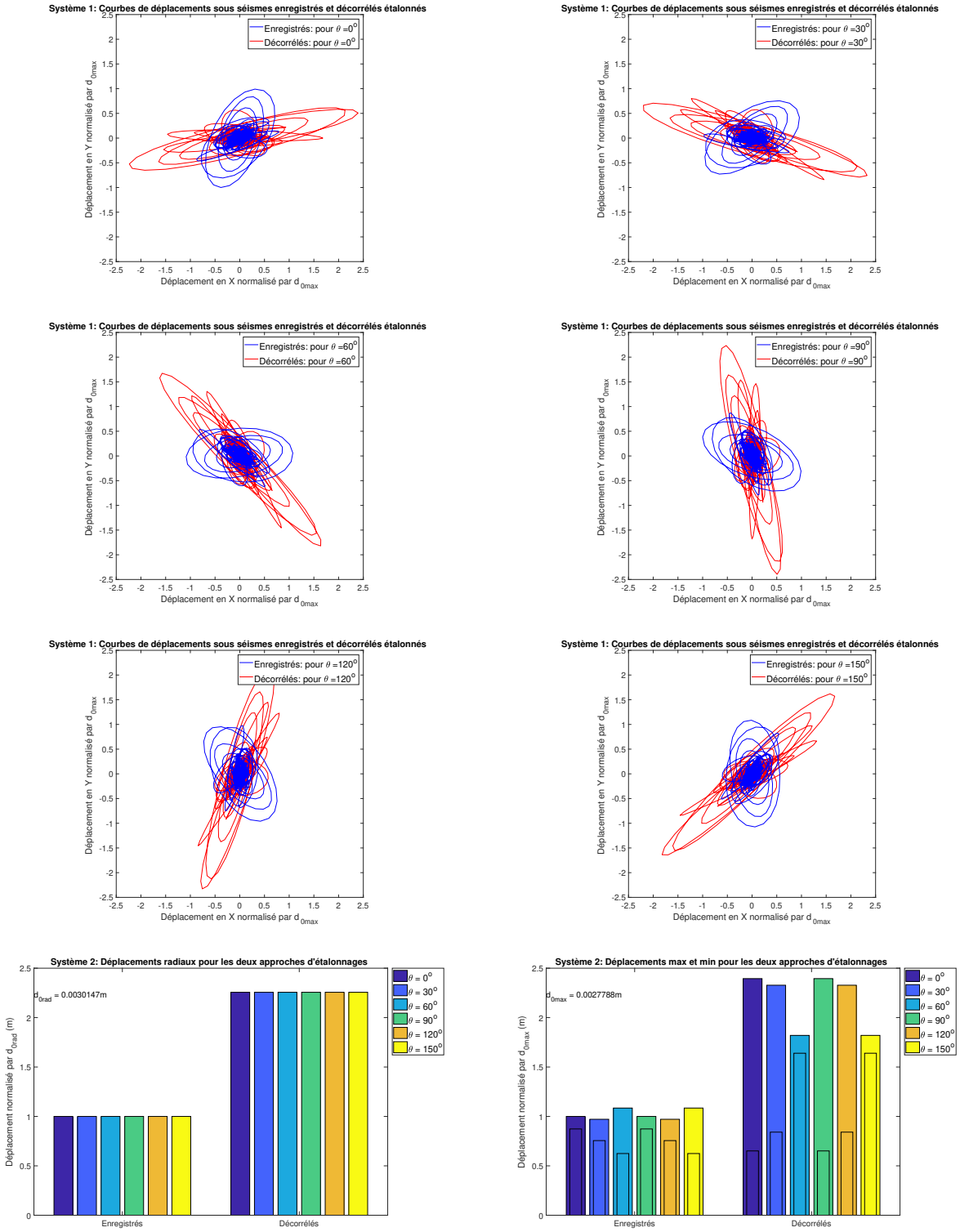

Figure C.4 Système structurel 2 T_x= 0.1 s, T_y= 0.1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

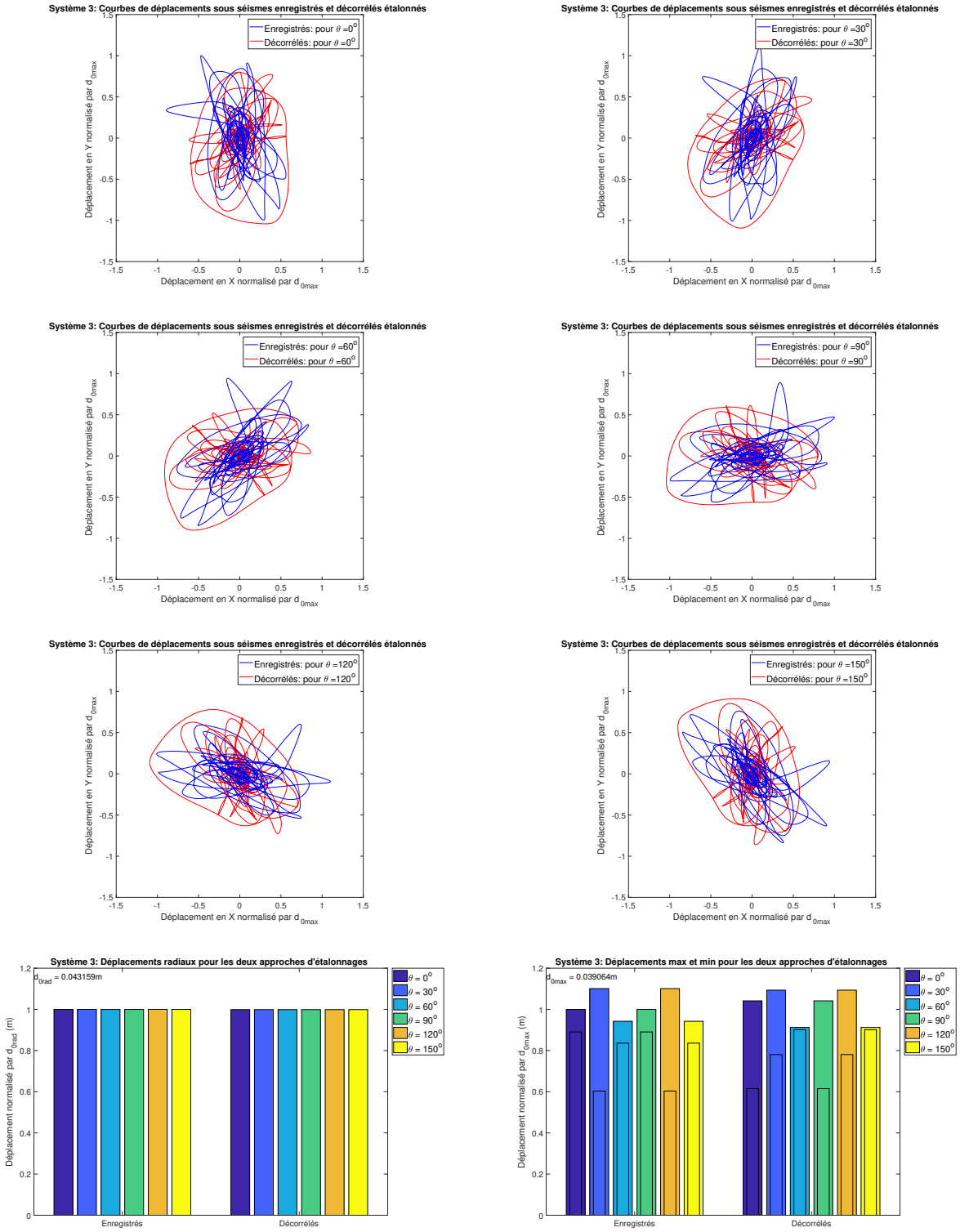

Figure C.5 Système structurel 3 T_x= 1 s, T_y= 1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

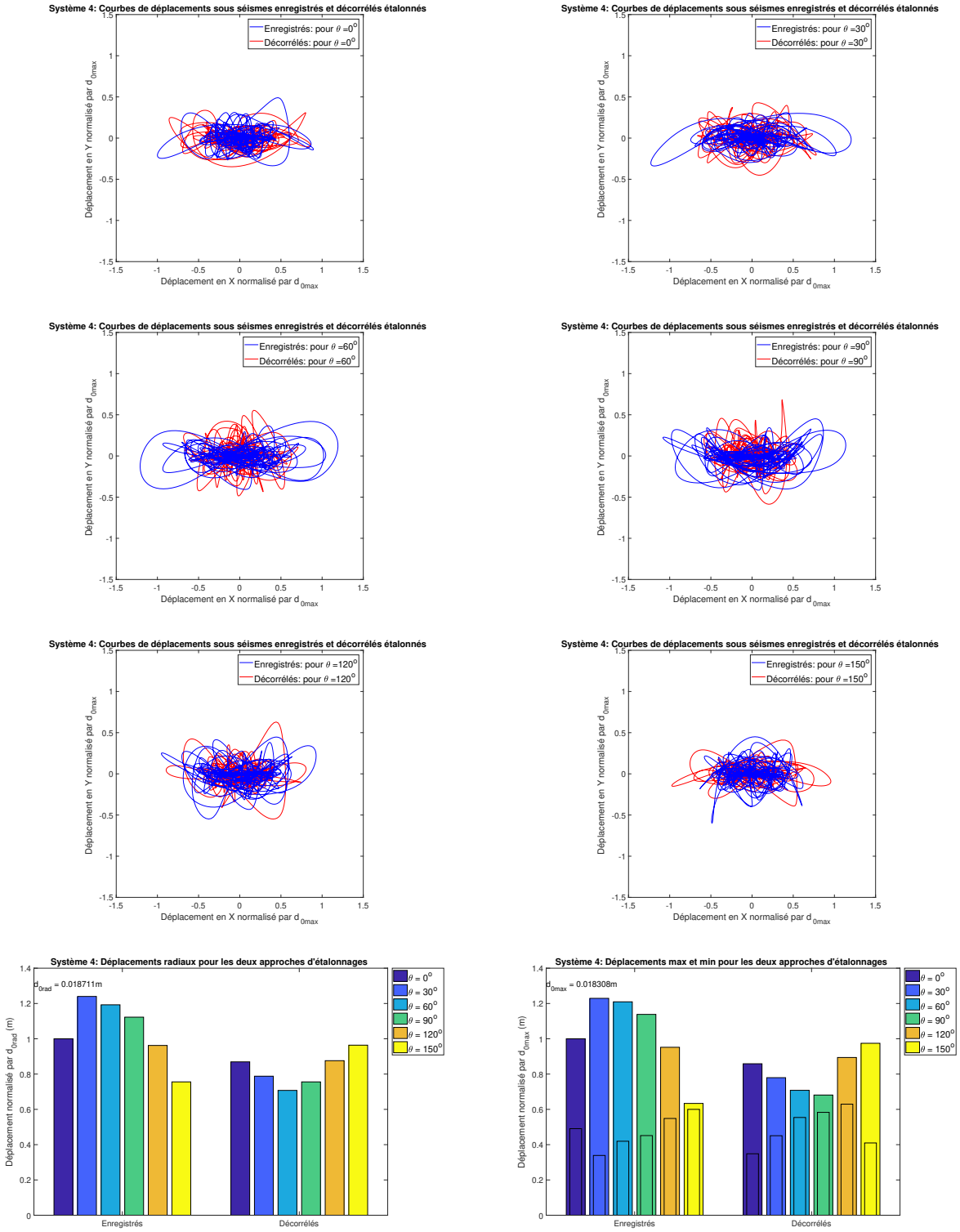

Figure C.6 Système structurel 4 T_x= 0.5 s, T_y= 0.25 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

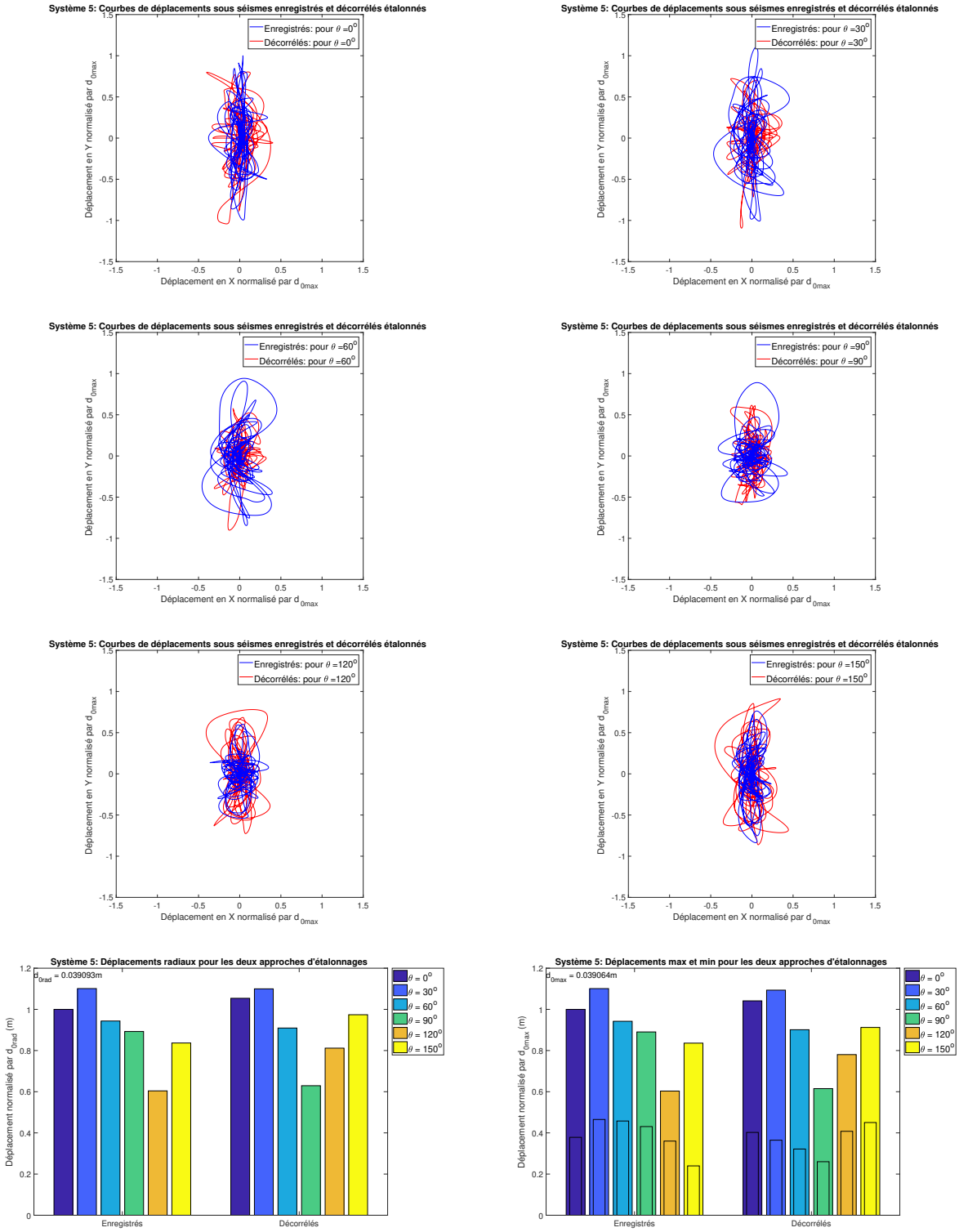

Figure C.7 Système structurel 5 T_x= 0.5 s, T_y= 1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

ANNEXE D COMPORTEMENT ÉLASTO-PLASTIQUE : RÉPONSE SOUS LES COMPOSANTES HORIZONTALES

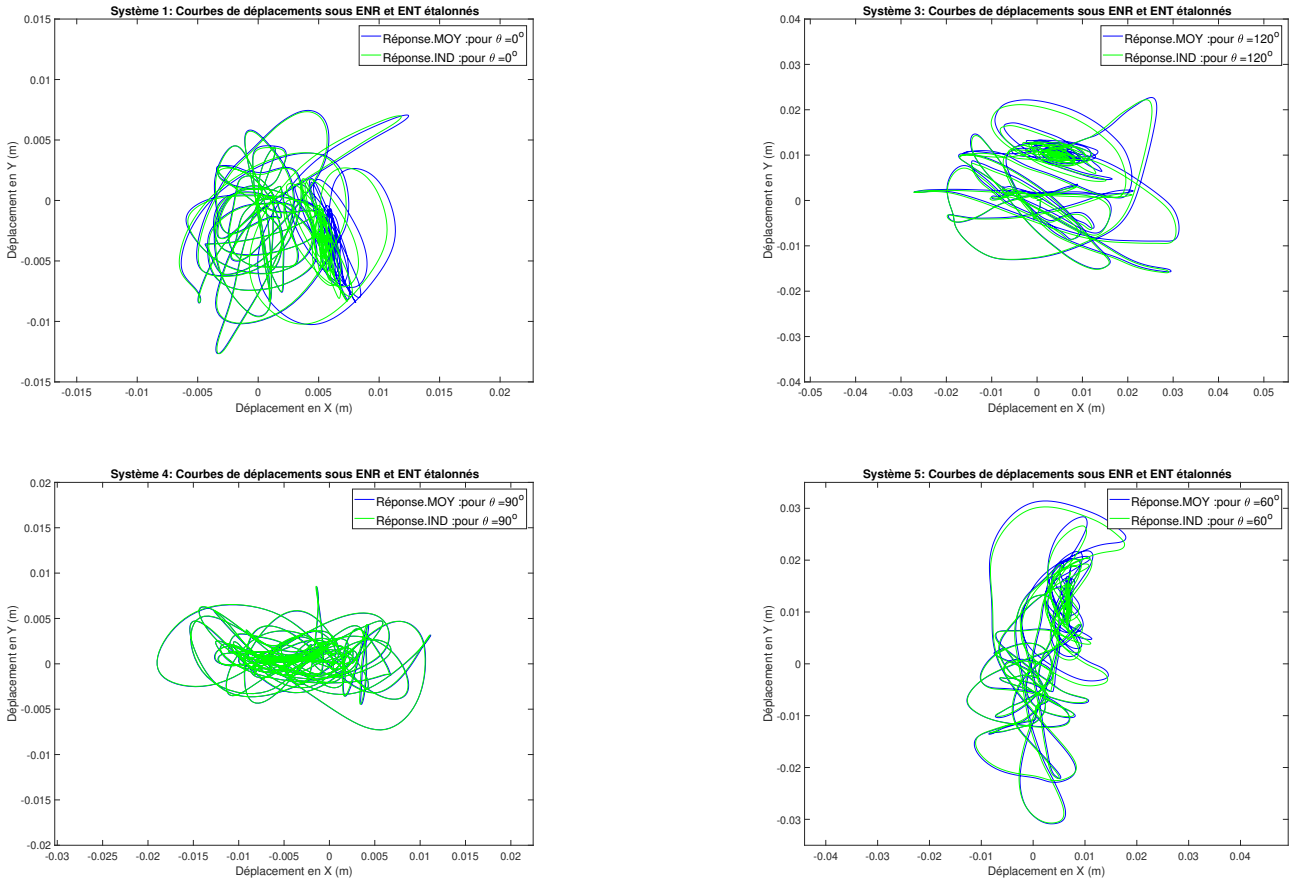

Figure D.1 Comportement bilinéaire plastique : Exemples de réponses sous des composantes spectrales enregistrés (ENR.MOY,ENT.MOY) et (ENR.IND,ENT.IND)

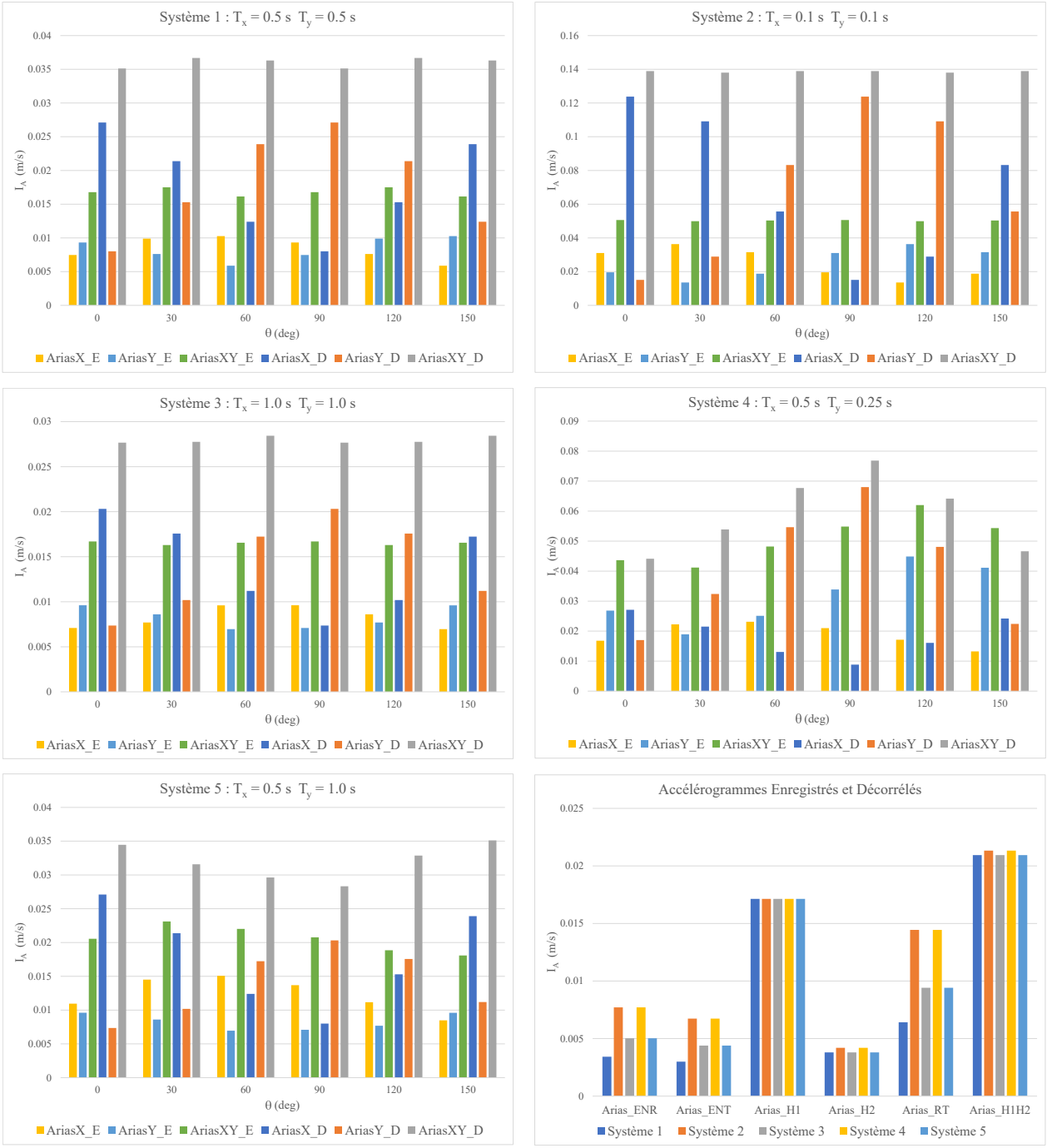

Figure D.2 Intensités d'Arias des accélérogrammes et des réponses en accélérations

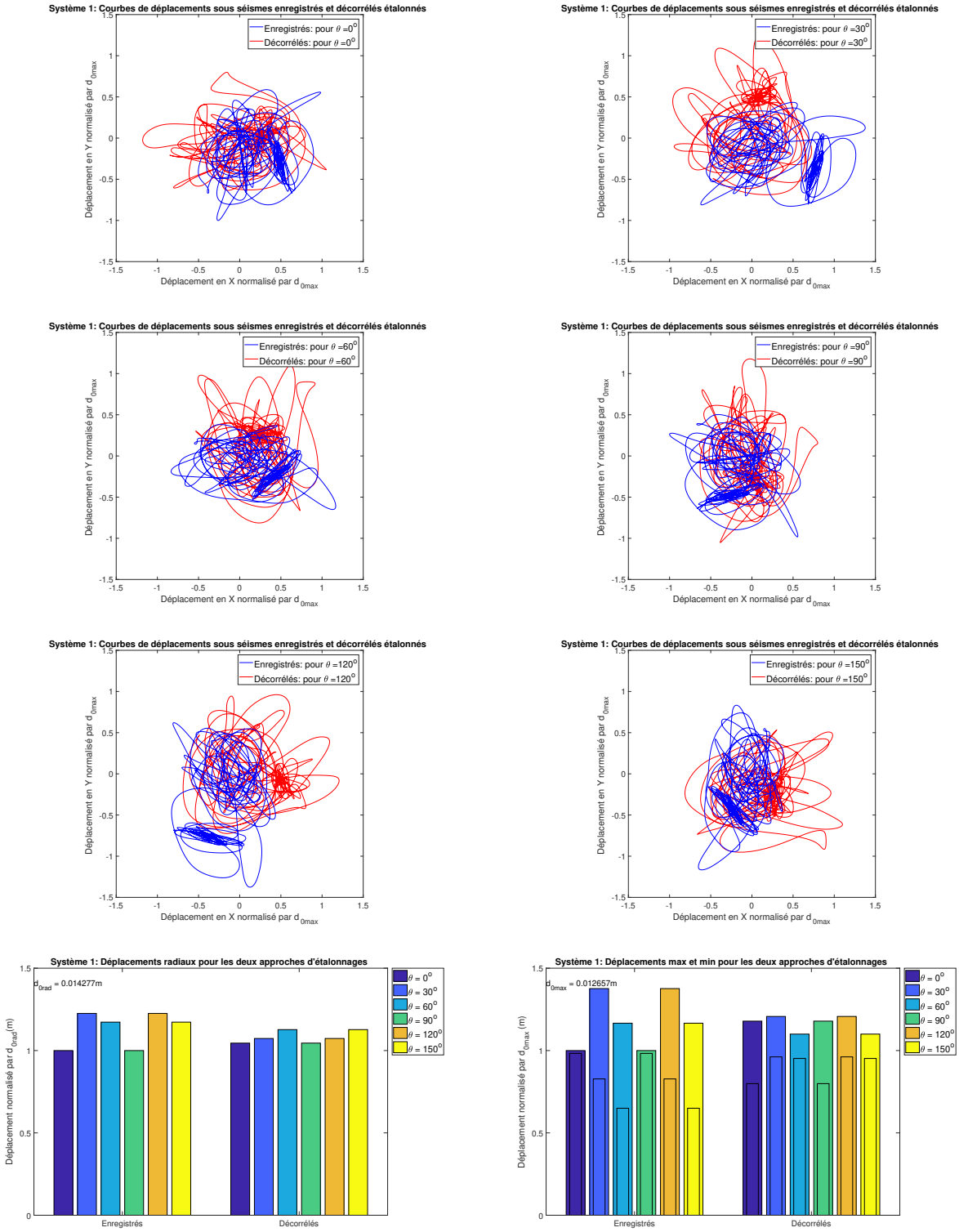

Figure D.3 Système structurel 1 T_x= 0.5 s, T_y= 0.5 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

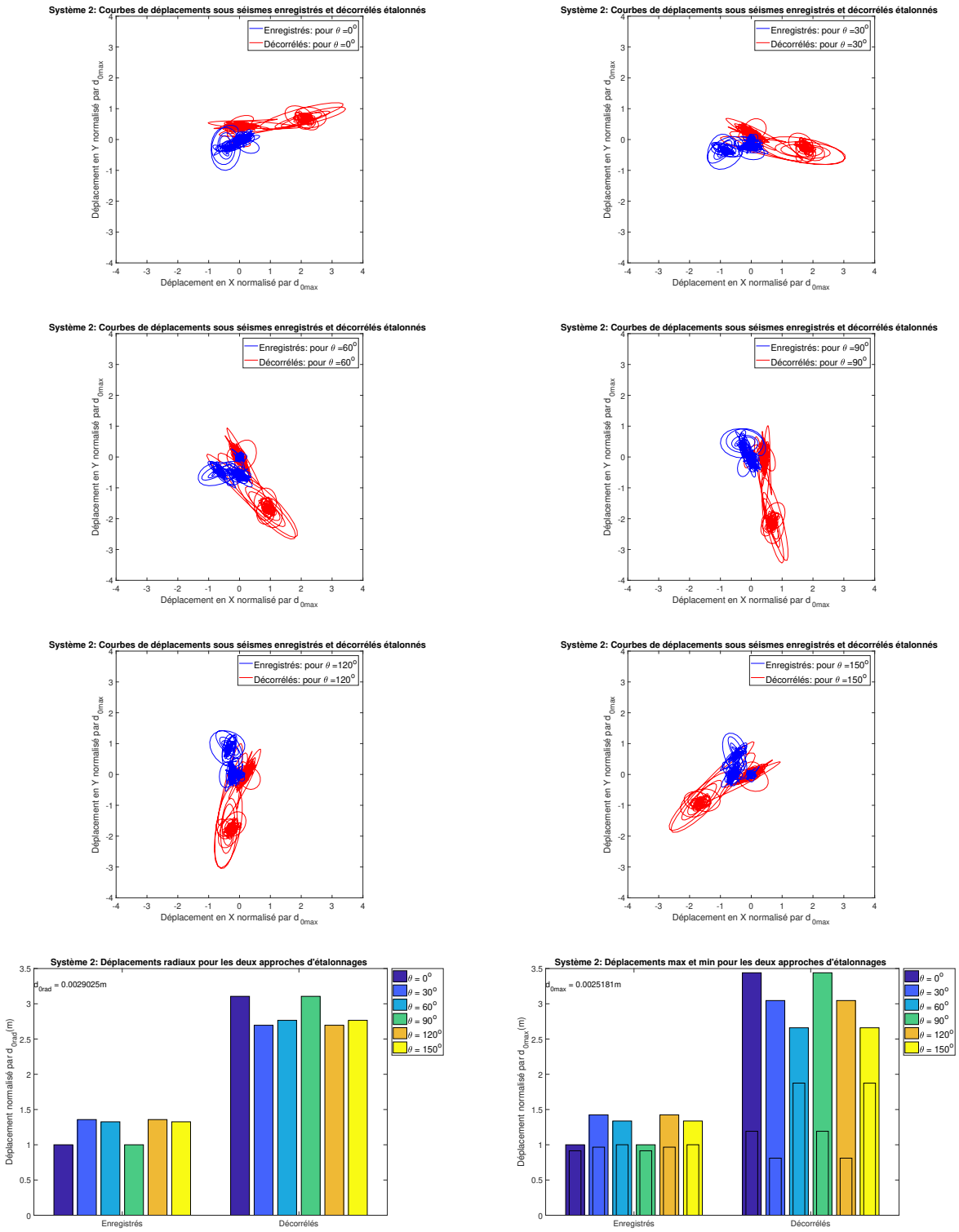

Figure D.4 Système structurel 2 T_x= 0.1 s, T_y= 0.1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

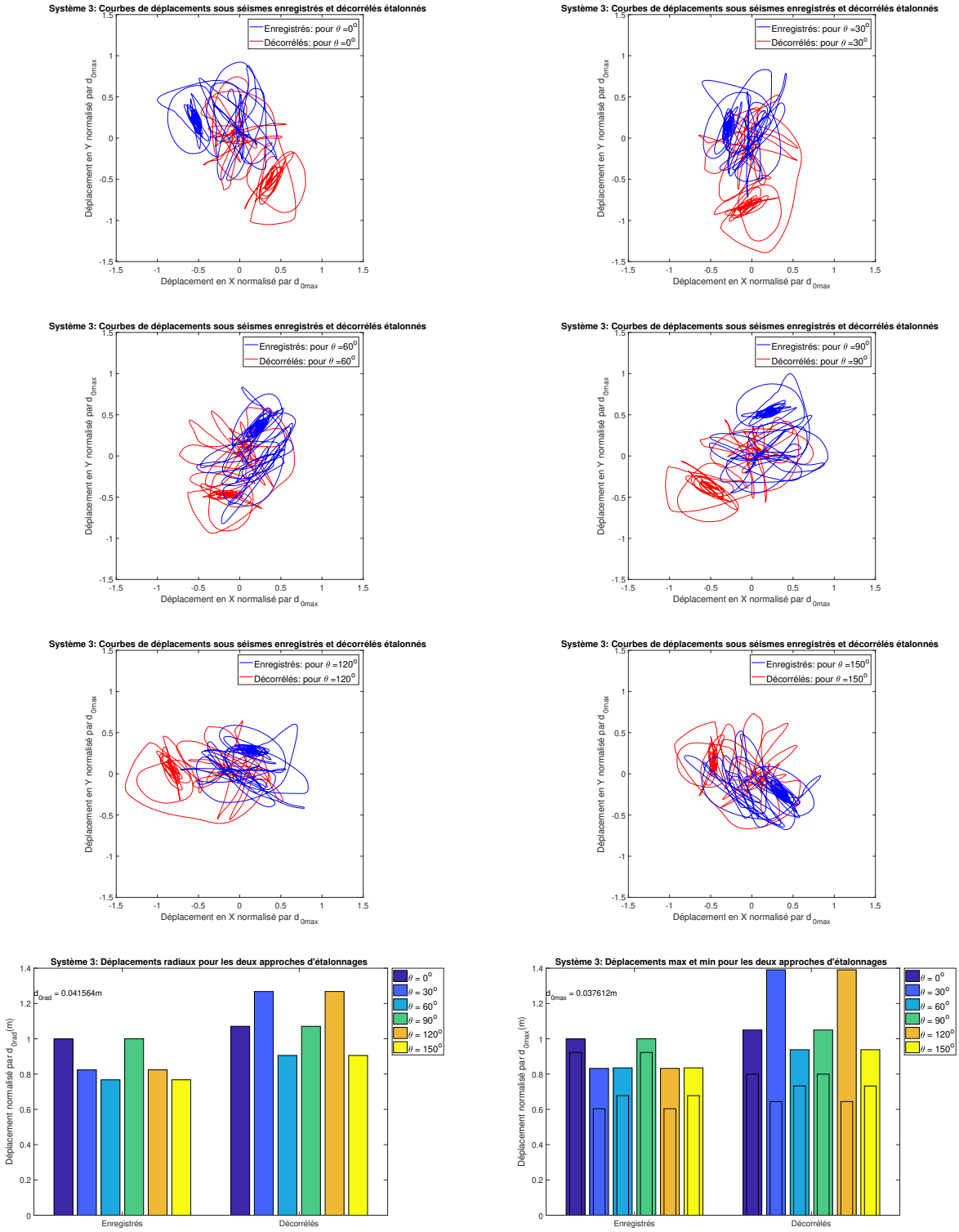

Figure D.5 Système structurel 3 T_x= 1 s, T_y= 1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

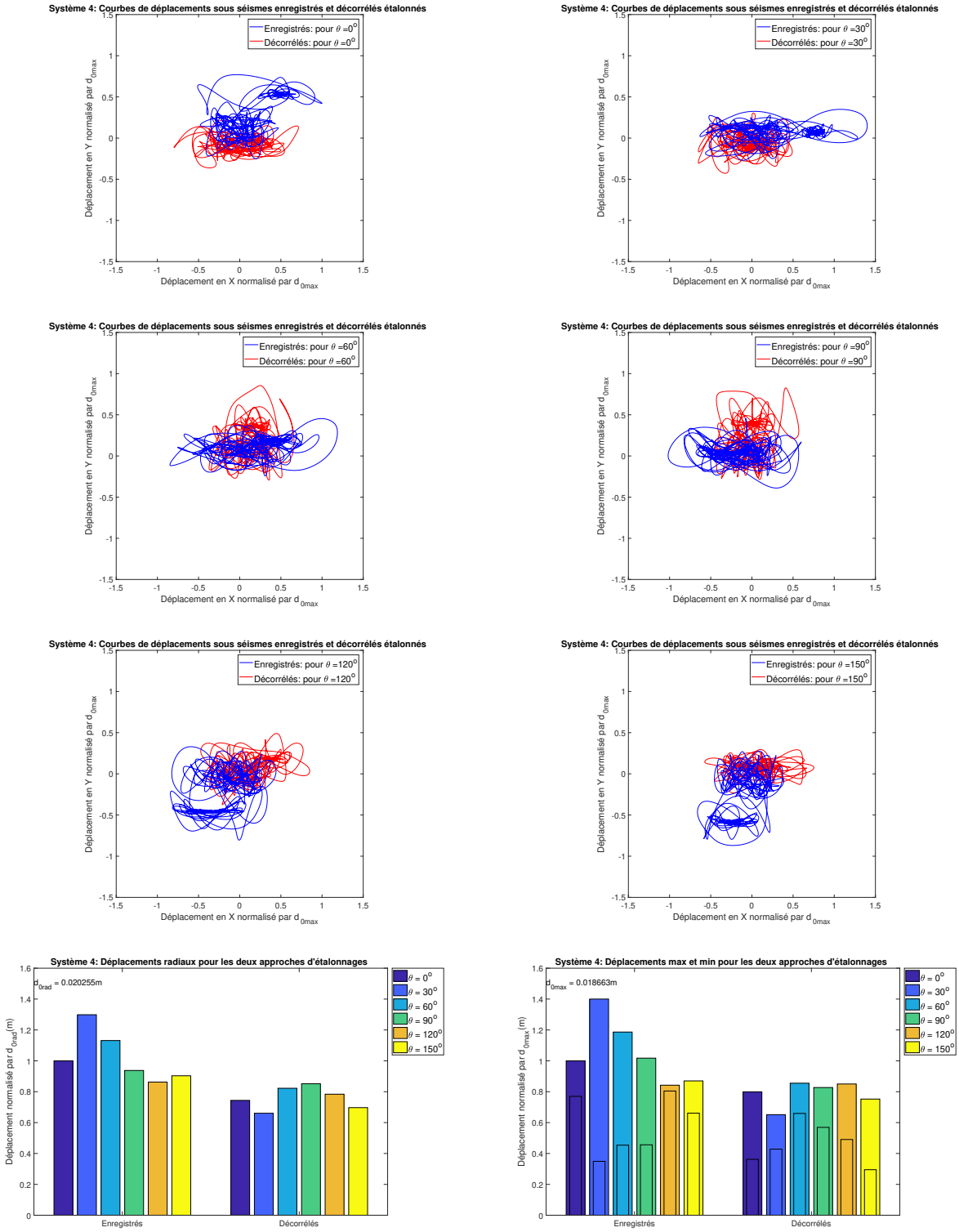

Figure D.6 Système structurel 4 T_x= 0.5 s, T_y= 0.25 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

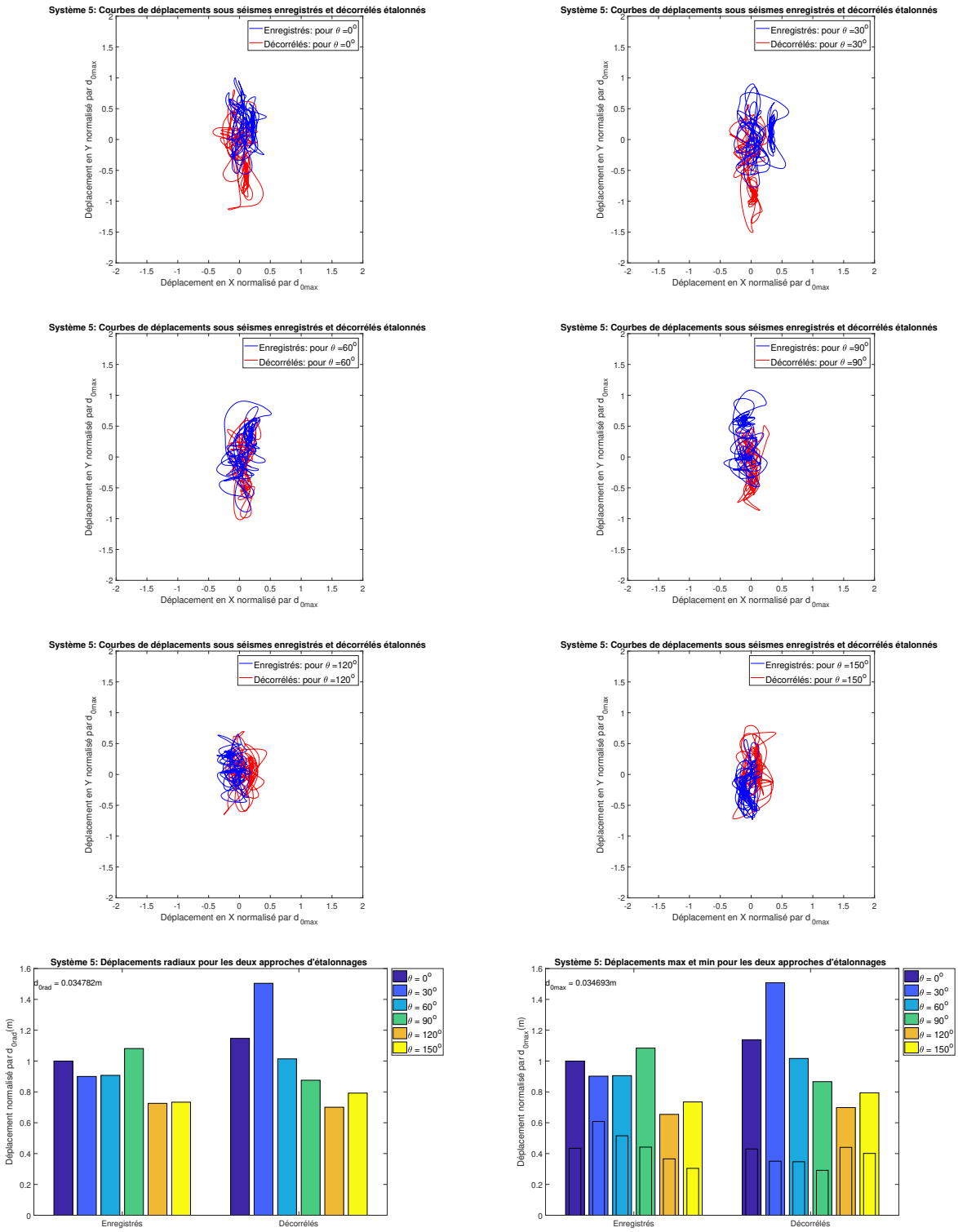

Figure D.7 Système structurel 5 T_x= 0.5 s, T_y= 1 s : Déplacement en X en fonction du déplacement en Y pour $\theta = 0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o$ et 150°

ANNEXE E SPECTRES DE RÉPONSES DES ACCÉLÉROGRAMMES ENREGISTRÉS ÉTALONNÉS PAR LA MÉTHODE MSE ET PGA

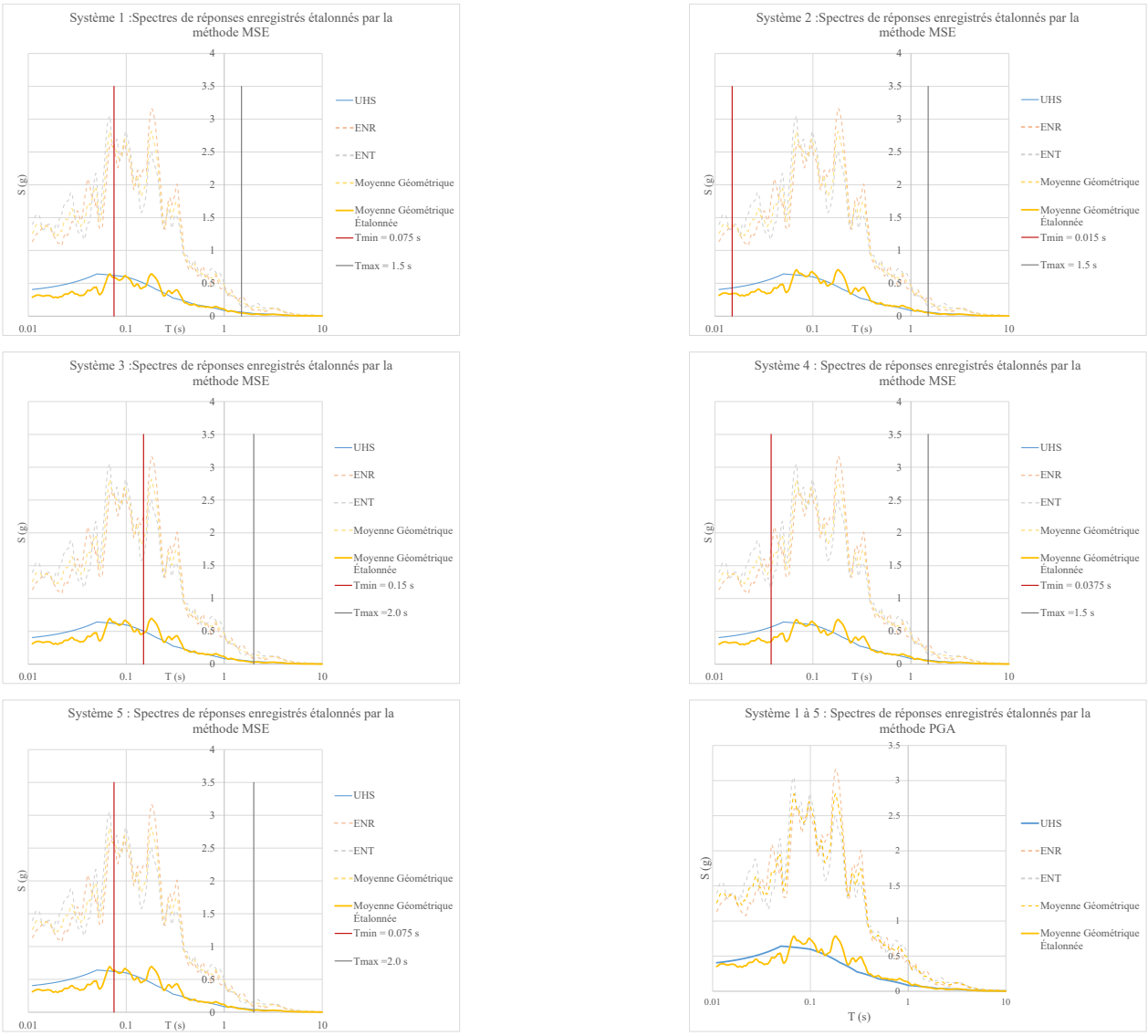

Figure E.1 Méthodes MSE et PGA : Spectres de réponses ENR et ENT étalonnés

ANNEXE F COMPORTEMENT LINÉAIRE ÉLASTIQUE : EFFET D'ÉTALONNAGE SUR LA RÉPONSE STRUCTURELLE

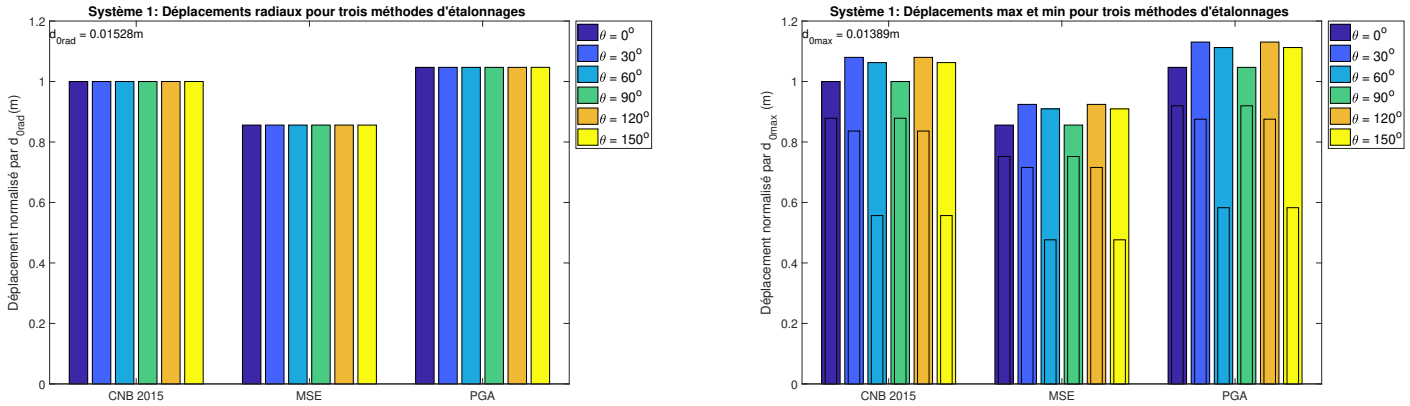

Figure F.1 Système structurel 1 T_x= 0.5 s, T_y= 0.5 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

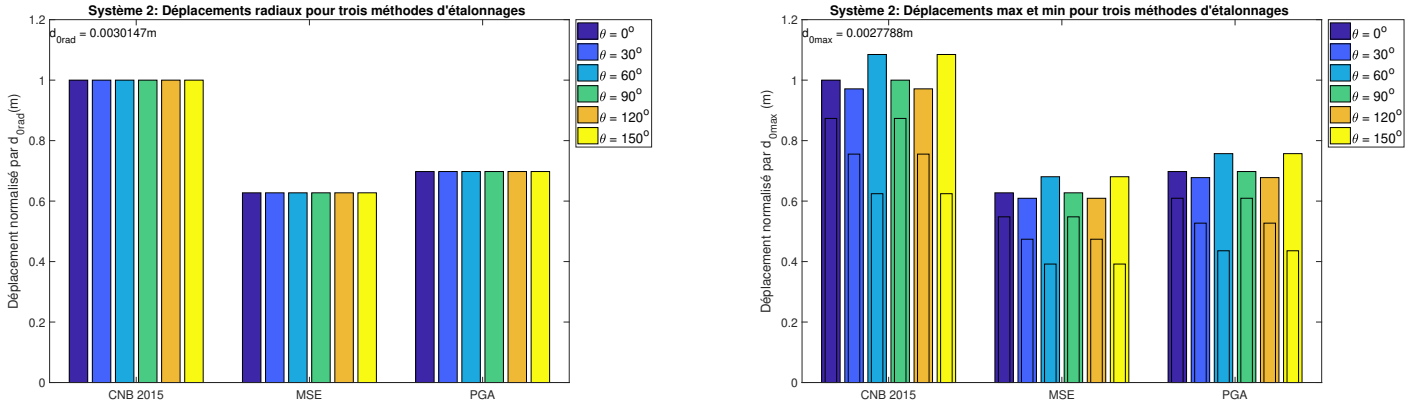

Figure F.2 Système structurel 2 T_x= 0.1 s, T_y= 0.1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

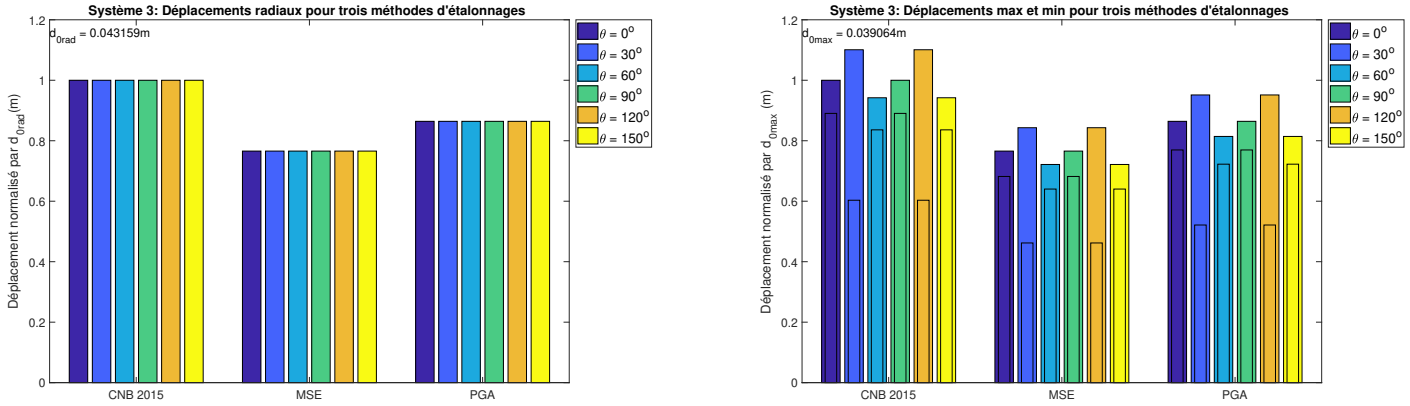

Figure F.3 Système structurel 3 T_x= 1 s, T_y= 1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

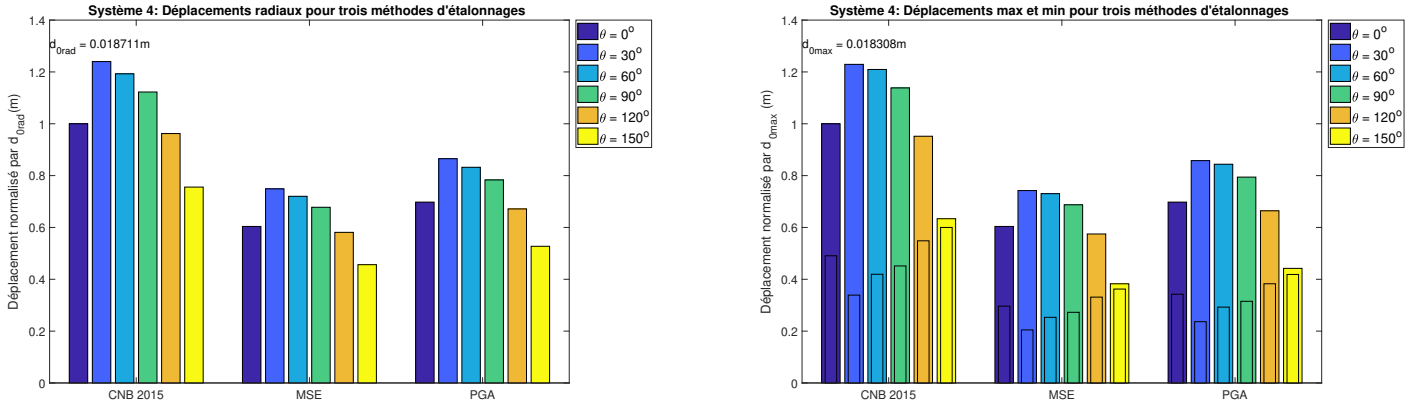

Figure F.4 Système structurel 4 T_x= 0.5 s, T_x= 0.25 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

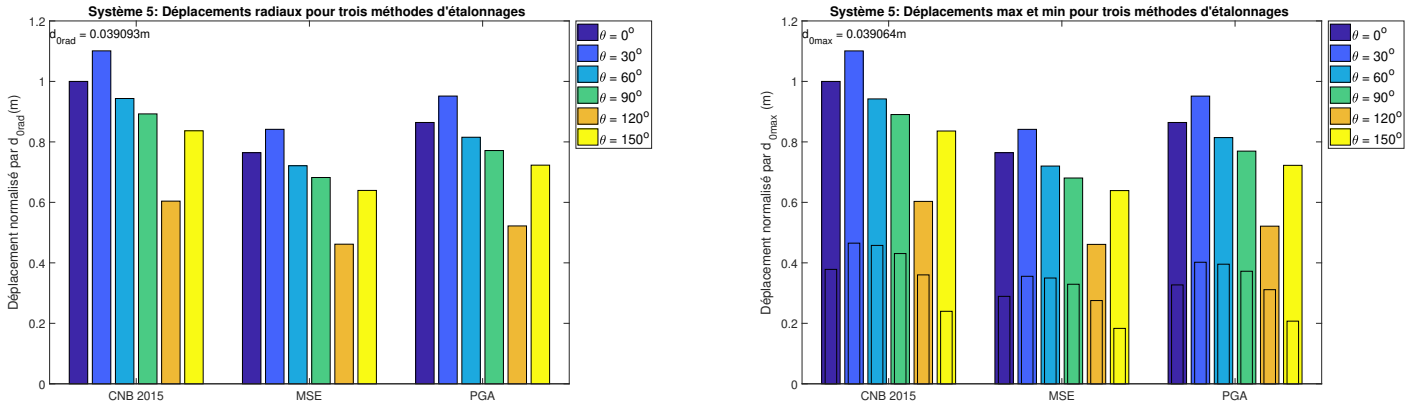

Figure F.5 Système structurel 5 T_x= 0.5 s, T_y= 1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

ANNEXE G COMPORTEMENT ÉLASTO-PLASTIQUE : EFFET D'ÉTALONNAGE SUR LA RÉPONSE STRUCTURELLE

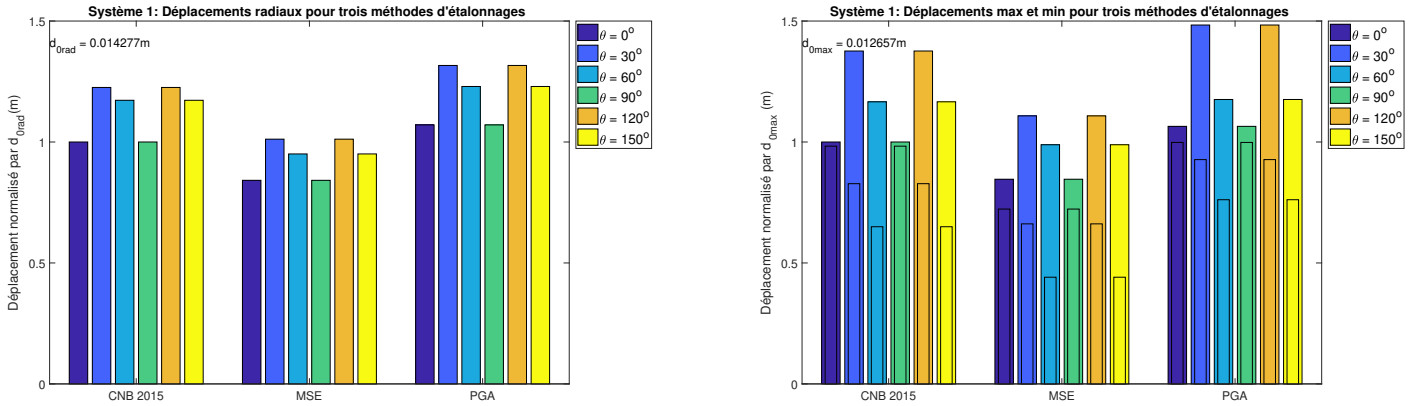

Figure G.1 Système structurel 1 T_x= 0.5 s, T_y= 0.5 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

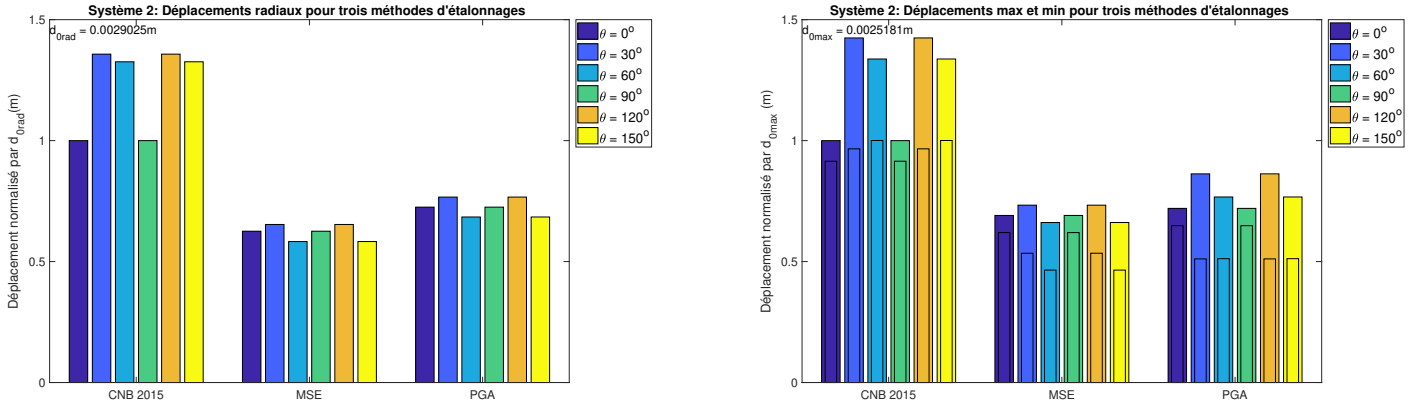

Figure G.2 Système structurel 2 T_x= 0.1 s, T_y= 0.1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

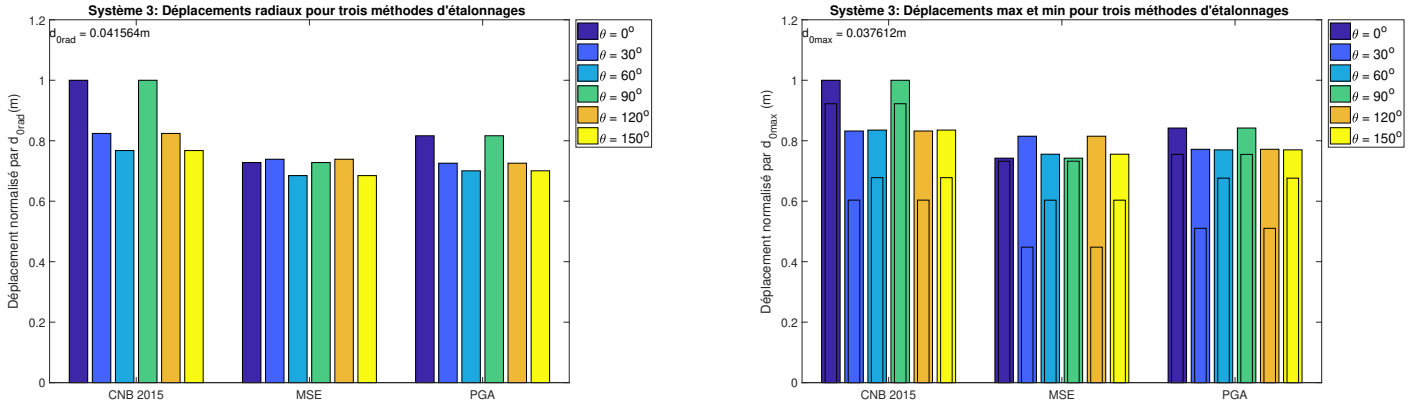

Figure G.3 Système structurel 3 T_x= 1 s, T_y= 1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

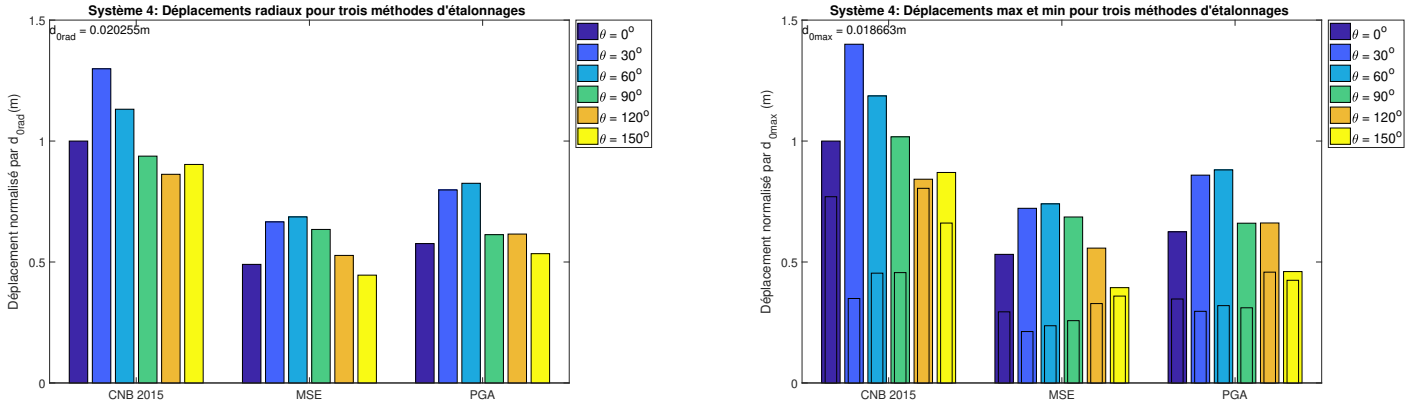

Figure G.4 Système structurel 4 T_x= 0.5 s, T_y= 0.25 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

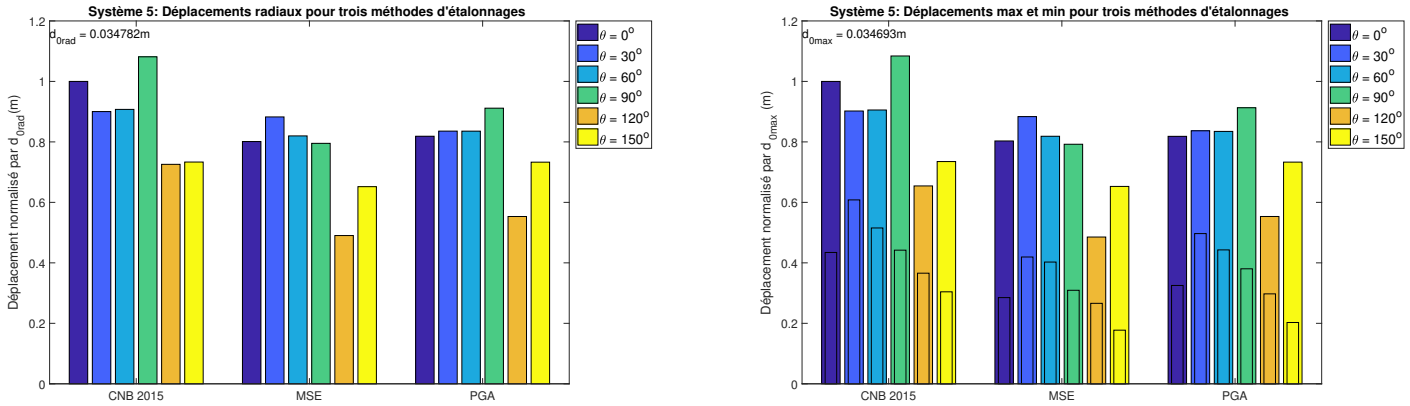

Figure G.5 Système structurel 5 T_x= 0.5 s, T_y= 1 s : Effet d'étalonnage sur la demande en déplacement

ANNEXE H ENSEMBLES DES SPECTRES DE RÉPONSES SÉLECTIONNÉS AVEC LES MÉTHODE CNB 2015 ET PGA

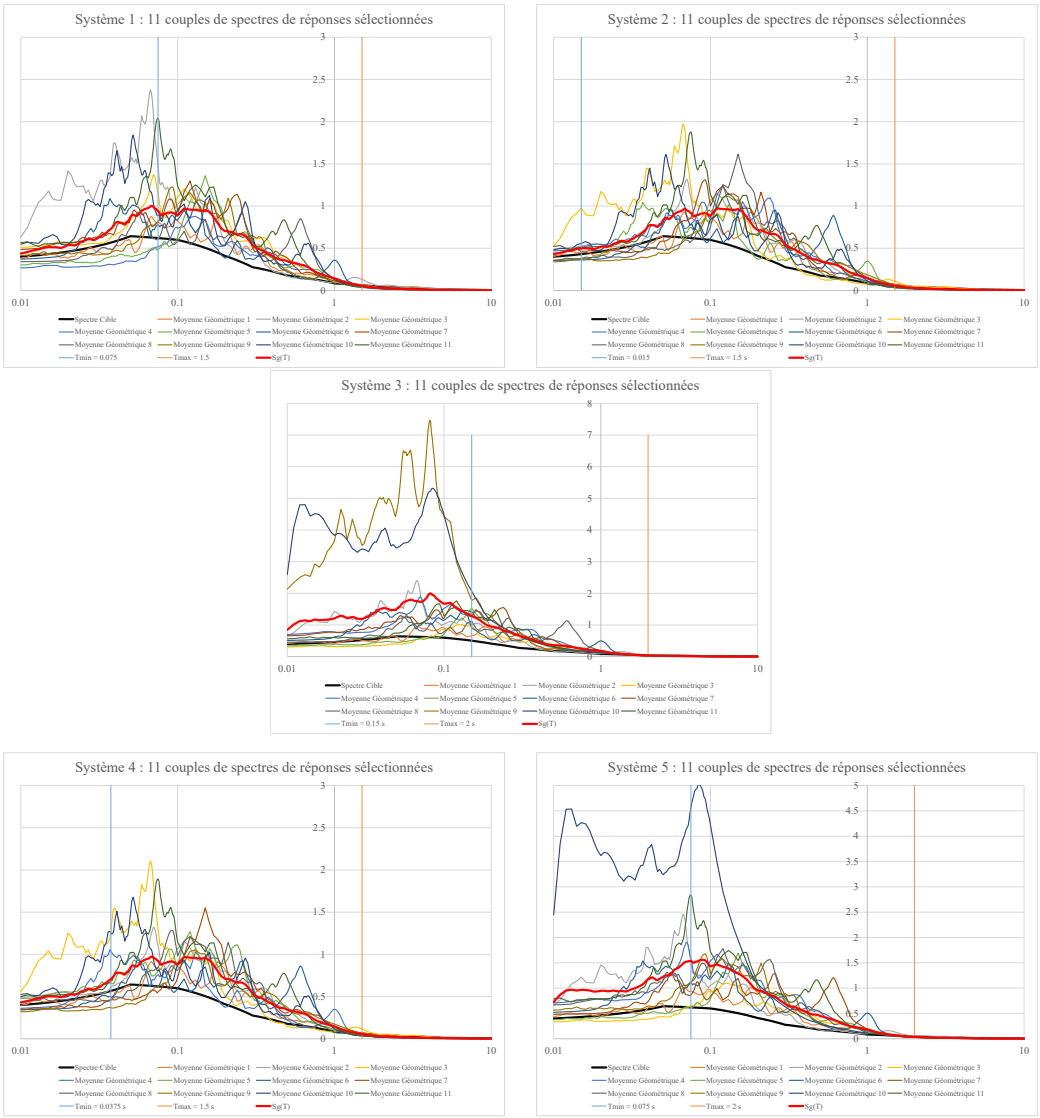

Figure H.1 Ensembles des spectres de réponses sélectionnés avec la méthode CNB2015

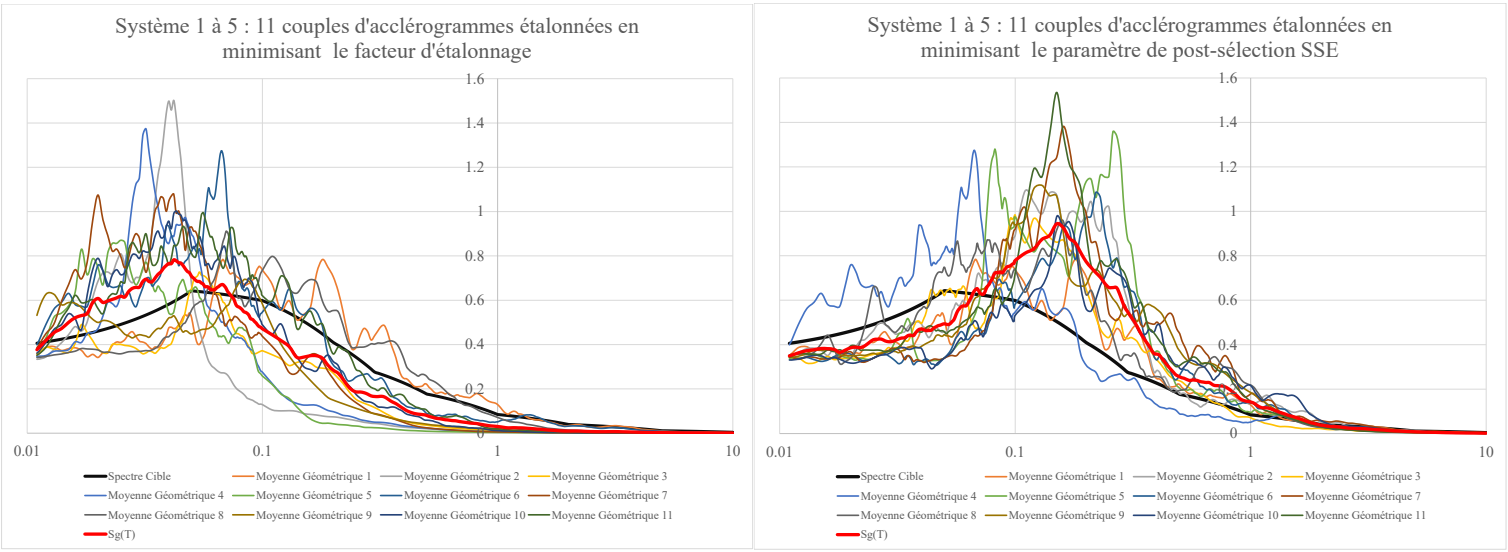

Figure H.2 Ensembles des spectres de réponses sélectionnés avec la méthode PGA