

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Développement et application in situ de nouvelles techniques pour déterminer
la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission en utilisant
les téléphones intelligents**

GAUTHIER MAGNAVAL

Département des Génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie civil

Décembre 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Développement et application in situ de nouvelles techniques pour déterminer
la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission en utilisant
les téléphones intelligents**

présenté par **Gauthier MAGNAVAL**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Sanda KOBOEVIC, présidente

Najib BOUAANANI, membre et directeur de recherche

Sébastien LANGLOIS, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mon directeur de recherche, le professeur Najib Bouaanani, pour m'avoir proposé ce projet et m'avoir accompagné tout au long de ma maîtrise.

Je tiens également à remercier les professeurs Sanda Koboevic et Sébastien Langlois d'avoir accepté de faire partie du jury d'examen de ma maîtrise.

Je voudrais aussi remercier la société Hydro-Québec pour le financement et l'accompagnement tout au long du projet. Mes remerciements s'adressent en particulier à Nadjib Bouikni pour le suivi du projet. Merci également à Guy Timmons et Alain Jean pour leur aide lors des essais in situ.

Je remercie aussi le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) pour le soutien financier de mon projet de recherche.

Merci également à l'École polytechnique de m'avoir permis de venir à Polytechnique Montréal pour réaliser ce projet.

Je souhaite aussi remercier tous les membres du Groupe de Recherche en génie des Structures (GRS) aux côtés desquels j'ai travaillé pendant deux ans. Je remercie tout particulièrement Marc Vanderweyen avec qui j'ai travaillé en collaboration pour la partie expérimentale de mon projet.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis du Québec et de France dont le soutien sans faille m'a permis de mener à terme mon projet de recherche.

RÉSUMÉ

Afin de s'assurer de la stabilité des pylônes haubanés des lignes de transmission, il est essentiel de mesurer la tension mécanique dans les haubans. Les méthodes les plus utilisées à cet effet par Hydro-Québec, partenaire du projet présenté dans ce mémoire, sont le tensiomètre PIAB et la méthode du retour d'onde. D'une part, le PIAB nécessite une calibration complexe. D'autre part, la méthode du retour d'onde dépend de l'utilisateur et peut s'avérer peu précise. Ainsi, il existe un besoin pour développer une nouvelle technique complémentaire.

La technique développée dans le cadre de ce mémoire est une implémentation de la méthode de vibration avec l'utilisation d'un téléphone intelligent. Elle nécessite trois étapes successives. Tout d'abord, les vibrations du hauban sont enregistrées pendant un temps donné. Ensuite, les signaux d'accélération sont utilisés en entrée d'une méthode d'analyse modale afin de déterminer la fréquence fondamentale du câble. Enfin, une formule pratique permettant de relier la fréquence fondamentale à la tension mécanique est appliquée. Les trois étapes sont implémentées dans une application pour téléphone intelligent développée sous Android. Un dispositif permettant de fixer le téléphone intelligent sur le hauban est conçu et une procédure de mise en œuvre est proposée. Finalement, la nouvelle technique et l'application mobile sont testées à l'aide d'une campagne d'essais in situ.

La méthode d'analyse modale et la formule pratique constituent les algorithmes de post-traitement. Elles sont choisies parmi des méthodes et des formules présélectionnées. Pour ce faire, une analyse de sensibilité est effectuée en analysant des modèles éléments finis de haubans. Les résultats de l'analyse montrent qu'il faut privilégier respectivement la méthode de sélection des pics et la formule de la corde vibrante.

La nouvelle technique développée au cours de ce projet est rapide et simple d'utilisation. De plus, la campagne d'essais in situ prouve qu'elle est à la fois plus efficace et plus précise que la méthode du retour d'onde.

ABSTRACT

The stability of guyed transmission towers is mainly ensured by their guy wires. The mechanical tensions in the guy wires have then to be regularly monitored. Currently, most frequently used methods are the PIAB tension meter and the wave-return method. On one hand, the tension meter requires a complex calibration. On the other hand, the wave-return method is user-dependent and can prove to lack accuracy. Therefore, there is a growing need for the development and validation of new techniques.

The new tension prediction technique proposed in this work is based on the use of smartphones. It finds its origins from the vibration method. Its operation requires three steps. Firstly, cable vibrations are recorded during a given time period. Secondly, a modal analysis method is performed on the acceleration data. The cable fundamental frequency is obtained. Thirdly, a practical formula is implemented. The mechanical tension is given as a function of the fundamental frequency. The three steps are gathered in an Android mobile phone application. In order to fasten the smartphone on the guy wire, a casing is designed. Additionally, a step by step procedure for the mechanical tension estimation is proposed. Finally, in-situ vibration tests are performed on a case study.

The modal analysis method and the practical formula are chosen from two predetermined lists. To achieve this, a finite elements model of a cable is build. The model is used in a sensitivity analysis. The Peak-Picking technique and the taut string formula are selected.

The proposed tension prediction technique is fast and user-friendly. Furthermore, the in-situ tests results show that it is at the same time more accurate and more reliable than the wave-return method. However, tests results also contain a few outliers. This needs to be investigated through additional laboratory tests.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvi
LISTE DES ANNEXES	xvii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte général de l'étude	1
1.2 Problématique et objectifs	4
1.3 Méthodologie	4
1.4 Contenu du mémoire	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Introduction	7
2.2 Application de la méthode de vibration en utilisant un téléphone intelligent	7
2.2.1 Description de la méthode de vibration	7
2.2.2 Caractéristiques des téléphones intelligents	10
2.2.3 Applications mobiles existantes	12
2.3 Méthodes d'analyse modale	14
2.3.1 Classification des techniques d'analyse modale	14
2.3.2 Description des méthodes applicables aux haubans	16
2.4 Calcul de la tension d'un câble à partir de ses fréquences naturelles	19
2.4.1 Équation dynamique du mouvement d'un câble	19
2.4.2 Théorie de la corde vibrante	20
2.4.3 Câble non-extensible	21
2.4.4 Câble sans rigidité flexionnelle	22

2.4.5	Prise en compte de l'extensibilité et de la rigidité flexionnelle	23
2.4.6	Résolution numérique	25
2.5	Conclusion	26

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE TECHNIQUE PERMETTANT DE MESURER LA TENSION MÉCANIQUE DANS LES HAUBANS DES LIGNES DE TRANSMISSION

		28
3.1	Objectifs et méthodologie	28
3.2	Études préliminaires	29
3.2.1	Études analytiques	29
3.2.2	Essais en conditions réelles	32
3.3	Conception d'un modèle numérique de câble	34
3.3.1	Modèle statique	34
3.3.2	Modèle dynamique	36
3.3.3	Validation du modèle	39
3.4	Implémentation de trois méthodes d'analyse modale	40
3.4.1	Méthode de sélection des pics	41
3.4.2	Méthode d'identification stochastique par sous-espaces fondée sur les covariances	43
3.4.3	Méthode de décomposition dans le domaine des fréquences	48
3.5	Étude de sensibilité : présentation	52
3.5.1	Présentation d'une simulation	52
3.5.2	Paramètres de l'étude	54
3.5.3	Automatisation des calculs et du post-traitement	55
3.6	Étude de sensibilité : résultats	56
3.6.1	Comparaison de la méthode du retour d'onde et de la méthode de vibration	57
3.6.2	Critique de la formule de la corde vibrante	58
3.6.3	Comparaison des trois méthodes d'analyse modale	59
3.6.4	Influence de la direction du déplacement initial du câble	60
3.6.5	Influence de l'amortissement	62
3.7	Conclusion	63

CHAPITRE 4 CONCEPTION D'UNE APPLICATION POUR TÉLÉPHONE INTELLIGENT PERMETTANT D'IMPLÉMENTER LA NOUVELLE TECHNIQUE

4.1	Objectifs et méthodologie	64
4.2	Développement des algorithmes en Java	65

4.2.1	Quelques notions d'informatique	65
4.2.2	Caractéristiques et architecture globale du programme	66
4.2.3	Liste des paquets et des classes	68
4.3	Création de l'interface à l'aide d'Android Studio	69
4.3.1	Architecture globale de l'application	69
4.3.2	Commencer une mesure	71
4.3.3	Historique des mesures	73
4.3.4	Mode d'emploi, Informations complémentaires, À propos	75
4.3.5	Caractéristiques de l'application et améliorations envisageables	76
4.4	Tests préliminaires	78
4.4.1	Test de fonctionnement de l'accéléromètre	78
4.4.2	Test de fonctionnement des algorithmes Java au sein de l'application	79
4.4.3	Comparaison des temps de calcul de chaque méthode d'analyse modale	81
4.5	Conclusion	82
CHAPITRE 5 APPLICATION DE LA NOUVELLE TECHNIQUE À L'AIDE D'ES-		
SAIS IN SITU SUR UN SUPPORT HAUBANÉ D'UNE LIGNE 735KV		83
5.1	Objectifs et méthodologie	83
5.2	Présentation des essais in situ	83
5.2.1	Choix du matériel	84
5.2.2	Proposition initiale de procédure	85
5.2.3	Liste des essais in situ	86
5.3	Application de la nouvelle technique	87
5.3.1	Approche qualitative	87
5.3.2	Approche quantitative	89
5.3.3	Comparaison avec la méthode du retour d'onde	89
5.3.4	Conclusions préliminaires	90
5.4	Procédure de mise en œuvre de la nouvelle technique	91
5.4.1	Choix du téléphone intelligent	91
5.4.2	Choix de la position d'attache	92
5.4.3	Choix de la direction de déplacement du câble	93
5.4.4	Choix de la méthode d'analyse modale	94
5.4.5	Proposition finale de procédure	95
5.5	Conclusion	96
CHAPITRE 6 CONCLUSION		97
6.1	Synthèse des travaux	97

6.2	Recommandations	98
6.3	Travaux futurs	99
	RÉFÉRENCES	100
	ANNEXES	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Tableau comparatif des caractéristiques de certains téléphones intelligents [11]	12
Tableau 2.2	Méthodes d'analyse modale expérimentales applicables aux haubans .	18
Tableau 2.3	Formules pratiques reliant la tension dans un câble à ses fréquences naturelles	25
Tableau 3.1	Tensions mécaniques obtenues en appliquant différentes formules pour un câble typique d'Hydro-Québec	31
Tableau 3.2	Températures et tensions mécaniques des essais préliminaires en conditions réelles	33
Tableau 3.3	Rigidités axiales équivalentes des pièces de l'ancrage	35
Tableau 3.4	Paramètres d'entrée constants	55
Tableau 3.5	Paramètres d'entrée variant pour chaque câble	55
Tableau 3.6	Moyennes et écarts-types des histogrammes de la figure 3.17	58
Tableau 3.7	Moyennes et écarts-types des histogrammes de la figure 3.18	58
Tableau 3.8	Moyennes et écarts-types des histogrammes de la figure 3.19	60
Tableau 3.9	Moyennes et écarts-types des histogrammes de la figure 3.20	61
Tableau 4.1	Paquets et classes des algorithmes en Java	68
Tableau 4.2	Classes Java de l'interface Android	76
Tableau 4.3	Fichiers XML de l'interface Android	77
Tableau 4.4	Résultats du test de fonctionnement des algorithmes Java au sein de l'application	81
Tableau 4.5	Comparaison des temps de calcul de chaque méthode d'analyse modale	82
Tableau 5.1	Caractéristiques des haubans du pylône de Terrebonne	83
Tableau 5.2	Spécifications du Motorola Moto G7 et du Samsung Galaxy A50 . . .	84
Tableau 5.3	Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.3	89
Tableau 5.4	Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.6	90
Tableau 5.5	Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.7	91
Tableau 5.6	Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.8	92

Tableau 5.7	Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.9	93
Tableau 5.8	Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.10	94
Tableau A.1	Paramètres généraux et avancés à renseigner pour chaque simulation - partie 1	106
Tableau A.2	Paramètres généraux et avancés à renseigner pour chaque simulation - partie 2	107
Tableau D.1	Tensions mécaniques mesurées avec un dynamomètre	111
Tableau D.2	Tensions mécaniques mesurées avec la méthode du retour d'onde . . .	111
Tableau D.3	Tensions mécaniques mesurées avec la nouvelle technique - partie 1 .	112
Tableau D.4	Tensions mécaniques mesurées avec la nouvelle technique - partie 2 .	113
Tableau D.5	Tensions mécaniques mesurées avec la nouvelle technique - partie 3 .	114

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Exemples de pylônes : (a) pylône classique ; (b) pylône Mae West ; (c) portique à treillis [1]	1
Figure 1.2	Ligne de la Romaine-2 - Arnaud - Photographie Hydro-Québec	2
Figure 1.3	Schémas d'un pylône en V : (a) Vue transversale ; (b) Vue du dessus [1]	2
Figure 1.4	Méthodes de mesure de la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission : (a) PIAB (b) Retour d'onde - Photographies Hydro-Québec	3
Figure 2.1	Dispositifs permettant d'appliquer la méthode de vibration : (a) Accéléromètre externe avec connection filaire ; (b) Accéléromètre externe avec connection sans fil ; (c) Téléphone intelligent	8
Figure 2.2	Attache pour téléphone intelligent [10]	9
Figure 2.3	Étapes de la méthode de vibration	10
Figure 2.4	Interface de l'application Orion-CC [10]	13
Figure 2.5	Interface de l'application Android [11]	14
Figure 2.6	Classification des techniques d'analyse modale expérimentales	15
Figure 2.7	Étapes de la méthode de sélection des pics : (a) Spectre comportant du bruit ; (b) Isolation des pics de grande amplitude ; (c) Isolation des pics dominants de chaque groupe [8]	17
Figure 2.8	Schéma d'un câble incliné statique	19
Figure 2.9	Travail à réaliser pour chaque étape de la méthode de vibration	27
Figure 3.1	Différences entre T , H et T_*	30
Figure 3.2	Écart intrinsèque entre les valeurs des tensions obtenues le PIAB et par la méthode du retour d'onde pour un câble typique d'Hydro-Québec	30
Figure 3.3	Pylône en V haubané de Terrebonne (Photographie par Najib Bouaanani)	32
Figure 3.4	Schéma du pylône en V haubané de Terrebonne vu du dessus	33
Figure 3.5	Ancrage au sol d'un hauban d'Hydro-Québec (Photographie Najib Bouaanani)	36
Figure 3.6	Principe de l'élément d'alignement : (a) état initial ; (b) état intermédiaire ; (c) état final	37
Figure 3.7	Schémas et graphes de la propagation de l'onde dans le modèle numérique	38
Figure 3.8	Graphes permettant de valider le modèle statique : (a) Évolution de la flèche en fonction de la rigidité axiale ; (b) Comparaison des profils pour $EA = 100$ kN	39

Figure 3.9	Graphes permettant de valider le modèle dynamique : (a) Évolution de la tension en fonction du nombre d'éléments; (b) Évolution de la tension en fonction du pas de temps	40
Figure 3.10	Étapes de la méthode PP : (a) Signal d'accélération; (b) Spectre de Fourier; (c) Sélection des pics	41
Figure 3.11	Étapes communes aux méthodes SSI	45
Figure 3.12	Étapes de la méthode SSI-COV : (a) Diagramme de stabilisation; (b) Dendogramme; (c) Histogramme avant application du critère de taille; (d) Histogramme après application du critère de taille	47
Figure 3.13	Étapes de la méthode FDD : (a) Courbes des valeurs singulières; (b) Évaluation de $f_{\text{SDOF},n}$ autour d'un pic; (c) Transformation de $f_{\text{SDOF},n}$ dans le domaine temporel; (d) Évaluation de la fréquence fondamentale associée	51
Figure 3.14	Résumé des trois méthodes d'analyse modale : (a) FFT; (b) SSI-COV; (c) FDD	51
Figure 3.15	Synthèse des sorties d'une simulation	53
Figure 3.16	Automatisation des calculs et du post-traitement	56
Figure 3.17	Différence relative entre la tension mécanique estimée et T_{cible}^* : (a) Méthode de vibration simple; (b) Méthode du retour d'onde	57
Figure 3.18	Décomposition de l'erreur : (a) Erreur due à la formule de la corde vibrante; (b) Erreur due à la méthode d'analyse modale	59
Figure 3.19	Différence relative entre la tension mécanique estimée et T_{mod} : (a) PP; (b) SSI-COV; (c) FDD	60
Figure 3.20	Différence relative entre la tension mécanique estimée et T_{cible}^* : (a) Direction \vec{e}_x ; (b) Direction \vec{n}	61
Figure 3.21	Spectre de Fourier de l'accélération en un point du câble : (a) $\xi = 0$; (b) $\xi = 0,01$; (c) $\xi = 0,02$; (d) $\xi = 0,03$	62
Figure 3.22	Déplacement en un point du câble en fonction du temps : (a) $\xi = 0$; (b) $\xi = 0,01$; (c) $\xi = 0,02$; (d) $\xi = 0,03$	63
Figure 4.1	Étapes de la nouvelle technique	64
Figure 4.2	Diagramme de classe	67
Figure 4.3	Diagramme de classe simplifié	67
Figure 4.4	Architecture globale de l'application	70
Figure 4.5	Capture d'écran du Menu principal	70
Figure 4.6	Captures d'écran de la page Choix des paramètres	71
Figure 4.7	Captures d'écran de la page Mesure - Affichages successifs	72

Figure 4.8	Captures d'écran de la page Mesure - Résultats	73
Figure 4.9	Capture d'écran de la page Liste des mesures	73
Figure 4.10	Captures d'écran de la page Affichage d'une mesure	74
Figure 4.11	Captures d'écran de la page Mode d'emploi	75
Figure 4.12	Capture d'écran de la page Informations complémentaires	76
Figure 4.13	Capture d'écran de la page À Propos	76
Figure 4.14	Graphes des accélérations mesurées avec un téléphone intelligent : (a) Application personnelle - Signaux avec offset ; (b) Physics Toolbox - Signaux avec offset ; (c) Application personnelle - Signaux sans offset ; (d) Physics Toolbox - Signaux sans offset	79
Figure 4.15	Signaux d'accélération selon l'axe \vec{e}_x enregistrés lors des essais préliminaires à Terrebonne : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 - Essai 1 ; (d) Hauban 3 - Essai 2 ; (e) Hauban 4 - Essai 1 ; (f) Hauban 4 - Essai 2	80
Figure 5.1	Schémas du dispositif d'attache : (a) Vue de devant ; (b) Vue de derrière - Dessins Marc Vanderweyen	85
Figure 5.2	Étapes de la procédure de mise en œuvre de la nouvelle technique . .	86
Figure 5.3	Tensions mécaniques mesurées par la nouvelle technique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4	87
Figure 5.4	Captures d'écran du Samsung Galaxy A50 : (a) Spectre de Fourier classique ; (b) Spectre de Fourier comportant du bruit	88
Figure 5.5	Captures d'écran du Motorola Moto G7 : (a) Sélection de pics non consécutifs pour la méthode PP ; (b) Sélection de pics non consécutifs pour la méthode FDD	88
Figure 5.6	Tensions mécaniques mesurées par la méthode du retour d'onde : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4	90
Figure 5.7	Influence du type de téléphone intelligent sur la tension mécanique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4	92
Figure 5.8	Influence de la position du téléphone intelligent sur la tension mécanique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4 . .	93
Figure 5.9	Influence de la direction de déplacement du câble sur la tension mécanique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4 . .	94
Figure 5.10	Influence de la méthode d'analyse modale sur la tension mécanique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4	95
Figure C.1	Pylône en V haubané - Photographie Najib Bouaanani	109
Figure C.2	Méthode du retour d'onde - Photographie Najib Bouaanani	109

Figure C.3	Installation du dynamomètre - Photographie Najib Bouaanani	109
Figure C.4	Affichage du dynamomètre - Photographie Najib Bouaanani	109
Figure C.5	Fixation du téléphone intelligent sur le hauban - Photographie Najib Bouaanani	110
Figure C.6	Lecture des résultats de la nouvelle technique - Photographie Najib Bouaanani	110
Figure C.7	Affichage de l'accélération sur le téléphone intelligent - Photographie Najib Bouaanani	110
Figure C.8	Affichage des résultats sur le téléphone intelligent - Photographie Najib Bouaanani	110

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

OS	Operating System
FFT	Fast Fourier Transform
DDL	Degré De Liberté
PP	Peak-Picking
TFD	Transformation de Fourier Discrète
FDD	Frequency Domain Decomposition
RD	Random Decrement
ITD	Ibrahim Time Domain
ERA/DC	Eigensystem Realization Algorithm with Data Correlation
SSI	Stochastic Subspace Identification
SSI-DATA	Data-driven Stochastic Subspace Identification
SSI-COV	Covariance-driven Stochastic Subspace Identification
TDD	Time Domain Decomposition
POO	Programmation Orientée Objet

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	TEXTE DE LA PAGE “MODE D’EMPLOI” DE L’APPLICATION POUR TÉLÉPHONE INTELLIGENT	104
Annexe B	TEXTE DE LA PAGE “À PROPOS” DE L’APPLICATION POUR TÉLÉPHONE INTELLIGENT	108
Annexe C	PHOTOGRAPHIES DES ESSAIS IN SITU	109
Annexe D	RÉSULTATS BRUTS DES ESSAIS IN SITU	111

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte général de l'étude

Afin de transporter l'électricité produite grâce à ses centrales hydroélectriques, Hydro-Québec¹ utilise des lignes de transmission. Les câbles conduisant l'énergie sont soutenus par des pylônes de différentes sortes. Certains de ces pylônes sont illustrés à la figure 1.1. Leur stabilité est primordiale. En effet, une chute de pylône peut causer d'importants dommages sur le réseau électrique allant jusqu'à la panne généralisée. À titre d'exemple, la « crise du verglas » de 1998 au Québec² causa la chute de 600 km de lignes de transport, ce qui priva plus d'un million de personnes d'électricité pendant plusieurs jours.

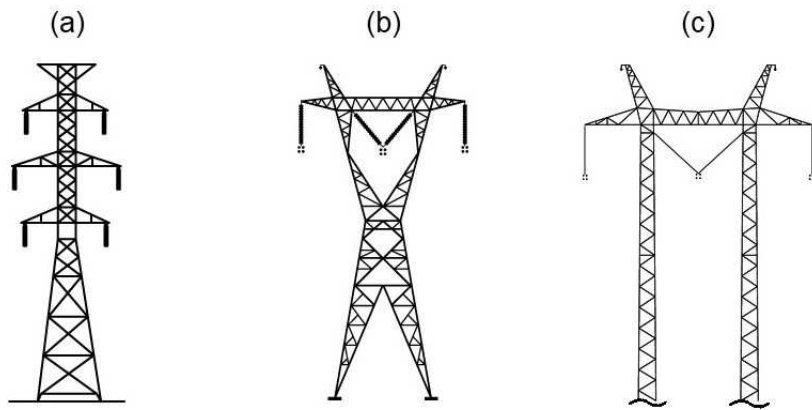


Figure 1.1 Exemples de pylônes : (a) pylône classique ; (b) pylône Mae West ; (c) portique à treillis [1]

La stabilité des pylônes de la figure précédente est assurée par la gravité. Pour d'autres pylônes d'Hydro-Québec, ce sont des haubans en acier ancrés dans le sol qui stabilisent la structure. À titre d'exemple, la ligne de la Romaine-2 - Arnaud illustrée à la figure 1.2 utilise des pylônes en V soutenus par quatre haubans. Deux schémas de ce type de pylône sont affichés à la figure 1.3 : une vue transversale (1.3a) et une vue du dessus (1.3b). Pour ce type de structure, connaître précisément la tension mécanique dans les haubans est essentiel. En effet, ceux-ci doivent être suffisamment tendus afin d'assurer la stabilité du pylône mais pas trop tendus pour éviter la rupture. Par ailleurs, la tension doit être égale dans les quatre

1. Le projet présenté dans ce mémoire a été réalisé en collaboration avec Hydro-Québec TransÉnergie.
2. Du 5 au 9 janvier 1998, d'importantes pluies verglaçantes s'abattent sur le sud du Québec.

câbles afin d'assurer la verticalité du pylône. Lors de l'opération de maintenance, si la tension mécanique mesurée n'appartient pas à une plage de tensions prédéfinie, le hauban doit être retensionné.



Figure 1.2 Ligne de la Romaine-2 - Arnaud - Photographie Hydro-Québec

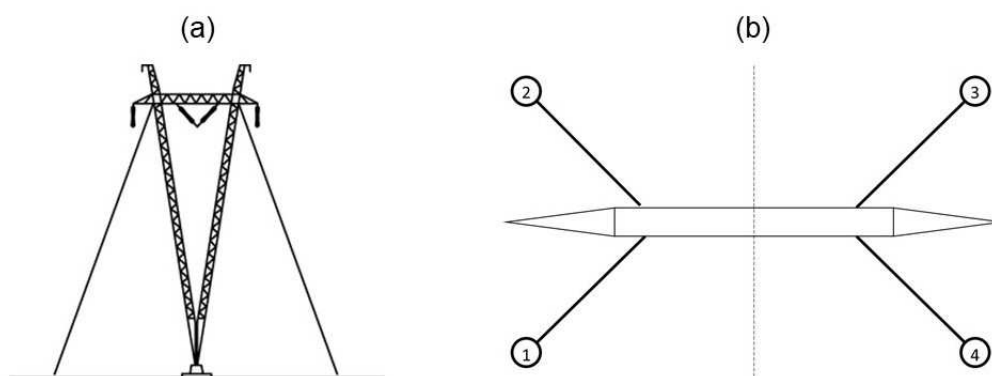


Figure 1.3 Schémas d'un pylône en V : (a) Vue transversale ; (b) Vue du dessus [1]

Actuellement, deux méthodes sont utilisées par Hydro-Québec pour calculer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission. Ces deux méthodes sont étudiées dans un avis technique interne à Hydro-Québec [2]. Leurs limites sont notamment soulignées.

La première méthode est une méthode *directe*, ce qui signifie que la force axiale dans le câble est mesurée directement. Cette méthode fait appel à un tensiomètre illustré à la figure 1.4a. Ce tensiomètre est appelé PIAB, du nom du fabricant [3]. Le principe est simple : il suffit de positionner le tensiomètre sur le hauban à une distance d'au moins un mètre du culot ou du

manchon et de lire la valeur directement sur l'appareil. À noter qu'il faut calibrer le PIAB pour chaque type de câble considéré.

Contrairement à la première méthode, la seconde est *indirecte*. Il s'agit de la méthode du retour d'onde. Celle-ci est basée sur les vibrations du câble et utilise une formule permettant de calculer la tension. La procédure est la suivante : l'utilisateur produit une onde à la main à une distance d'au moins un mètre du culot ou du manchon du hauban (voir figure 1.4b), chronomètre le temps qu'il faut à l'onde pour faire cinq allers-retours et applique la formule suivante :

$$T = 4 \times m \times L^2 / t^2 \quad (1.1)$$

avec T la tension en newton (N), m la masse linéique en kilogramme par mètre (kg/m), L la longueur du hauban en mètre (m) et t le temps chronométré en seconde (s) divisé par cinq. Cette méthode permet d'obtenir un résultat très rapidement. Cependant, elle est généralement peu précise. En effet, l'onde n'étant pas ponctuelle, il est difficile de déterminer précisément le moment exact du retour d'onde. Par conséquent, deux utilisateurs différents effectuant la même procédure risquent d'obtenir des valeurs différentes.

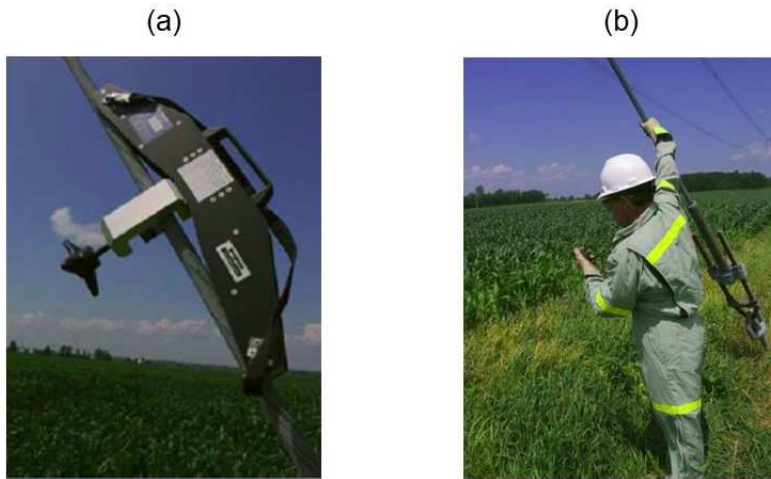


Figure 1.4 Méthodes de mesure de la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission : (a) PIAB (b) Retour d'onde - Photographies Hydro-Québec

1.2 Problématique et objectifs

Face aux limites des méthodes actuelles, il existe un besoin pour développer une nouvelle technique permettant de mesurer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission. En particulier, la nouvelle technique doit :

- être plus précise que les méthodes actuelles et ne pas dépendre de l'utilisateur ;
- nécessiter une calibration peu complexe ;
- être simple et rapide d'utilisation ;
- être utilisable sur toutes les lignes de transmission d'Hydro-Québec.

En résumé, la nouvelle technique doit être une alternative viable au PIAB et à la méthode du retour d'onde [2]. Sa simplicité d'utilisation est un point crucial. En effet, la maintenance des lignes de transmission se fait en été comme en hiver et dans des conditions météorologiques parfois difficiles. Il est donc important de pouvoir installer rapidement l'outil et de permettre une lecture de la tension directement sur l'appareil.

L'objectif de ce projet est de développer et d'appliquer in situ une nouvelle technique ayant les caractéristiques définies précédemment. Celle-ci s'appuie sur l'utilisation d'un téléphone intelligent combinant l'acquisition et le post-traitement des données de vibration du hauban.

L'objectif général se décompose en trois objectifs spécifiques :

1. Corroborer les limites des techniques actuelles et montrer l'efficacité de la nouvelle technique à l'aide d'un modèle numérique ;
2. Développer l'application mobile et la procédure associée pour mesurer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission ;
3. Évaluer la précision de la nouvelle technique à travers des essais in situ sur des haubans de pylônes réels.

1.3 Méthodologie

Le projet se décompose en quatre activités qui découlent des objectifs spécifiques définis précédemment : revue de littérature, modélisation et simulation numérique, conception d'une application pour téléphone intelligent et application in situ.

La revue de littérature constitue la première activité du projet. Elle est orientée selon trois axes. Le premier axe permet de comprendre comment mesurer la tension mécanique dans un hauban de pont à l'aide d'un téléphone intelligent. Cette technique fait notamment appel à une méthode d'analyse modale expérimentale et une formule reliant les fréquences naturelles d'un câble à sa force axiale. Dans les deuxième et troisième axes de la revue de littérature, les méthodes d'analyse modale et les formules sur la tension applicables aux haubans des lignes de transmission sont listées.

Afin de choisir la méthode d'analyse modale et la formule sur la tension les plus adaptées à notre cas, un modèle numérique dynamique de câble est construit. Il s'agit d'un modèle éléments finis bâti avec le logiciel ADINA. En plus de reproduire numériquement la nouvelle technique utilisant un téléphone intelligent, le modèle doit permettre de critiquer les méthodes actuelles (PIAB et méthode du retour d'onde).

Une fois que la nouvelle technique a été développée à l'aide d'un modèle numérique, il faut l'implémenter. Pour cela, une application pour téléphone intelligent est conçue. Celle-ci doit permettre l'enregistrement de l'accélération du câble et doit implémenter les algorithmes choisis précédemment. L'application est programmée sous Android.

Dans le but d'appliquer la nouvelle technique, une série d'essais in situ est effectuée. Ces essais permettent de tester l'application mobile et la procédure de la nouvelle technique en conditions réelles.

1.4 Contenu du mémoire

Ce mémoire est composé de six chapitres. Tout d'abord, la présente introduction permet de souligner le contexte du projet, dégager la problématique et les objectifs et présenter la méthodologie. Elle est suivie d'une revue de littérature extensive (chapitre 2) divisée en trois parties : mesure de la tension mécanique dans les haubans de ponts à l'aide d'un téléphone intelligent, méthodes d'analyse modale et calcul de la tension d'un câble à partir de ses fréquences naturelles. Les chapitres suivants abordent le travail réalisé au cours de la maîtrise. Le chapitre 3 décrit le développement de la nouvelle technique permettant de mesurer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission à l'aide d'un téléphone intelligent. On y trouve la conception d'un modèle numérique dynamique ainsi qu'une étude de sensibilité permettant de dégager la meilleure méthode d'analyse modale et la meilleure

formule liant les fréquences naturelles d'un câble à sa force axiale. Ensuite, le chapitre 4 décrit la conception de l'application pour téléphone intelligent permettant d'implémenter la nouvelle technique. En particulier, il contient la description des algorithmes programmés en Java, la présentation de l'interface et une série de tests préliminaires permettant de montrer le bon fonctionnement de l'application. Celle-ci est testée à travers des essais in situ présentés au chapitre 5. Ces essais permettent de tester la nouvelle technique en conditions réelles et de proposer une procédure de mise en œuvre. Enfin, le chapitre 6 conclut ce mémoire.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Il existe de nombreuses méthodes permettant de mesurer la tension mécanique dans un câble. Elles sont classées en deux catégories : les méthodes directes et les méthodes indirectes. L'approche directe consiste à relever directement la valeur de la tension dans le câble. Si cette approche est d'une grande précision, elle comporte de nombreux inconvénients. Par exemple, la méthode *lift-off* est destructive, les jauges de déformation sont peu fiables dans le cas des câbles en acier et les cellules de charge préinstallées sont chères et limitées par leur durée de vie. Pour toutes ces raisons, les ingénieurs se tournent souvent vers une approche indirecte en choisissant la méthode de vibration. Le principe est de déterminer les fréquences naturelles du câble afin de remonter à sa tension. Les vibrations peuvent être collectées par un accéléromètre fixé au câble, un interféromètre laser [4], un vibromètre laser [5] ou même une caméra vidéo [6, 7]. En particulier, la méthode de vibration est souvent utilisée pour mesurer la tension mécanique dans les haubans des ponts. Certaines applications utilisent l'accéléromètre présent dans un téléphone intelligent pour enregistrer les vibrations du câble.

Ce chapitre présente une revue de littérature approfondie. La section 2.2 décrit l'application de la méthode de vibration à l'aide d'un téléphone intelligent. La section 2.3 liste les différentes méthodes d'analyse modale expérimentales permettant de déterminer les fréquences naturelles d'un câble. Enfin, la section 2.4 propose différentes approches pour relier les fréquences naturelles à la tension mécanique.

2.2 Application de la méthode de vibration en utilisant un téléphone intelligent

Dans cette section, une revue de l'application de la méthode de vibration en utilisant un téléphone intelligent est effectuée. Toutes les études décrites dans la littérature ont été réalisées dans le cadre des haubans de ponts. L'objectif est de comprendre la méthode afin de la modifier et de l'optimiser pour qu'elle soit applicable aux haubans des lignes de transmission.

2.2.1 Description de la méthode de vibration

L'utilisation de téléphones intelligents pour la maintenance de structures haubanées est évoquée pour la première fois dans la littérature scientifique en 2013 [8]. Auparavant, la méthode

de vibration était appliquée en utilisant des accéléromètres externes reliés avec ou sans fil à un ordinateur traitant les données. L'avantage évident des téléphones intelligents est leur aspect hautement intégré. Les capteurs (accéléromètre, gyroscope), le processeur et la mémoire permettent de regrouper l'acquisition des données, le post-traitement et le stockage au niveau du téléphone. Comme le montre la figure 2.1, ceci permet d'éviter un dispositif filaire trop encombrant ou une perte d'information liée à la communication sans fil entre le capteur et l'ordinateur. La démarche à suivre pour estimer la tension mécanique dans un câble à l'aide de la méthode de vibration comporte trois étapes : acquisition des données, analyse modale et détermination de la tension.

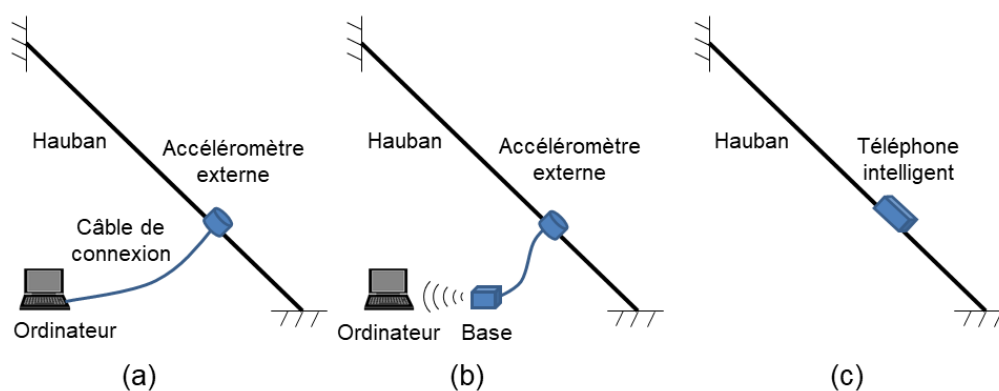


Figure 2.1 Dispositifs permettant d'appliquer la méthode de vibration : (a) Accéléromètre externe avec connexion filaire ; (b) Accéléromètre externe avec connexion sans fil ; (c) Téléphone intelligent

L'acquisition des données est l'étape la plus critique puisqu'elle conditionne toute la suite. Il s'agit de collecter l'historique de l'accélération du câble en un point donné pendant un temps donné. Plusieurs éléments sont à prendre en compte. Tout d'abord, le téléphone doit être parfaitement fixé au câble. Une mauvaise fixation ne permet pas d'aboutir aux fréquences naturelles [9]. Les haubans de lignes de transmission ayant un diamètre plus faible que les haubans de ponts, il est encore plus difficile de fixer correctement le téléphone. Un dispositif d'attache pour fixer l'appareil au hauban devra être conçu. À titre d'exemple, la figure 2.2 montre l'attache choisie par Zhao et ses collègues [10]. Par ailleurs, la position du téléphone a aussi son importance. Il faut éviter d'être trop proche d'un nœud de vibration du câble. Une distance entre le dispositif et le point d'attache du hauban au sol égale à 2 à 3% de la longueur totale du câble est généralement préconisée [11]. Cette distance correspond à peu près à celle imposée pour le tensiomètre PIAB et la méthode du retour d'onde (1 m minimum depuis le culot ou le manchon du hauban). Enfin, le type d'excitation (naturelle ou forcée)

et le temps d'acquisition doivent aussi être étudiés afin d'optimiser la précision des résultats. Ici, les résultats donnés par certains articles dans le cadre des ponts [9–12] ne peuvent pas être immédiatement transposés au cas qui nous intéresse. À noter qu'il est possible d'utiliser plusieurs téléphones simultanément [11] : en enregistrant l'accélération du câble en plusieurs points, la précision de la méthode est augmentée.



Figure 2.2 Attache pour téléphone intelligent [10]

Une fois les données d'accélération collectées, il faut déterminer les fréquences naturelles du câble. Pour ce faire, différentes méthodes d'analyse modale existent : sélection des pics, diminution aléatoire, domaine temporel d'Ibrahim, méthode de réalisation avec corrélation de données, identification stochastique par sous-espaces, décomposition dans le domaine des fréquences, décomposition dans le domaine temporel ... Ces méthodes sont décrites dans la section 2.3.

Enfin, les fréquences naturelles peuvent être reliées à la tension mécanique du câble grâce à des formules simples ou des méthodes numériques. Les formules simples font des hypothèses parfois contraignantes mais sont rapides et faciles à implémenter. Les méthodes numériques sont plus précises mais aussi plus coûteuses en temps de calcul. Ceci fait l'objet de la section 2.4.

Les trois étapes de la méthode de vibration sont résumées sur la figure 2.3.

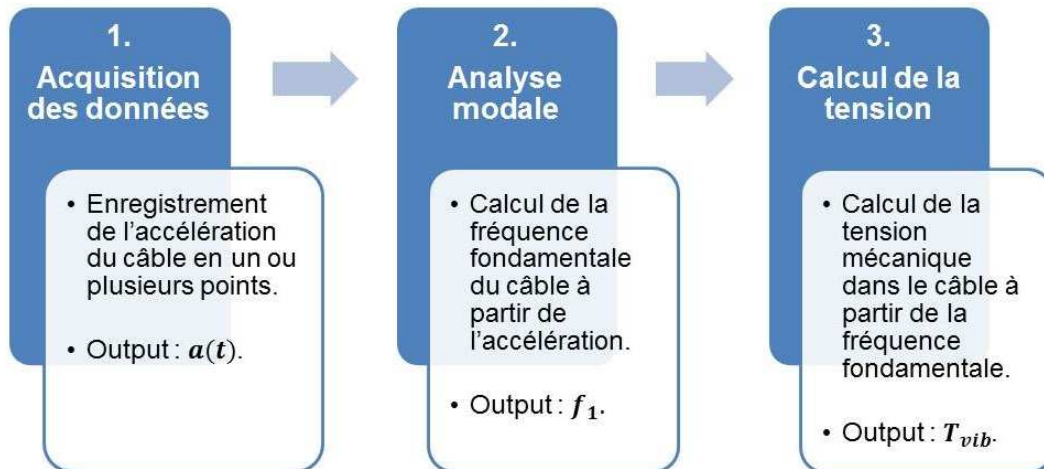


Figure 2.3 Étapes de la méthode de vibration

2.2.2 Caractéristiques des téléphones intelligents

Les performances de la méthode décrite à la section précédente dépendent fortement du téléphone intelligent choisi. Les caractéristiques les plus importantes des téléphones intelligents dans le cadre d'une application de la méthode de vibration sont :

- l'accéléromètre intégré caractérisé par sa bande-passante, sa résolution et sa fréquence d'acquisition ;
- le processeur permettant d'effectuer les calculs nécessaires à l'estimation de la tension ;
- l'espace de stockage ;
- la résistance aux conditions extrêmes.

Une attention particulière doit être portée à l'accéléromètre. Sa fréquence d'acquisition doit être 5 à 10 fois supérieure aux fréquences mesurées. Un minimum de 100 Hz est donc requis et il est préférable d'avoir une valeur plus élevée. D'un téléphone à un autre, la bande passante, la résolution et la fréquence d'acquisition du capteur peuvent varier grandement. Toutefois, les accéléromètres intégrés tendent à être de plus en plus performant [11]. Il est à noter que le système d'exploitation (en anglais Operating System, abrégé par la suite OS) du téléphone diminue parfois les performances des capteurs. On ne peut pas se fier à la notice de l'accéléromètre, il faut faire des tests. Il est possible de connecter le téléphone à des capteurs externes pour vérifier les performances des capteurs intégrés [9]. L'erreur faite sur la tension due à leur manque de précision peut aller jusqu'à 5% pour des modèles de téléphone datant de 2013 [8] et 2015 [10]. À noter que parmi les OS classiques (Android, iOS), le choix d'Android Stock peut s'avérer judicieux. Android Stock est la version de base d'Android créée par Google.

Elle ne contient aucune surcouche du constructeur et limite au maximum la diminution des performances des capteurs intégrés au téléphone intelligent.

Le processeur ne pose généralement pas problème. En effet, les résultats issus du post-traitement des données effectué avec l'iPhone 4S et l'iPhone 5S s'écartent de moins de 1% par rapport aux résultats issus du post-traitement des mêmes données effectué avec Matlab [10]. Au même titre que les accéléromètres, les processeurs des téléphones intelligents sont de plus en plus performants sur les nouveaux modèles. Enfin, l'espace de stockage généralement disponible est suffisant pour pouvoir collecter un grand nombre de données.

Dans un article publié en 2017 [11], Morgenthal propose un tableau comparatif des caractéristiques de plusieurs téléphones intelligents mis en vente entre 2010 et 2016. Ce tableau est retranscrit ci-après (tableau 2.1). Il compare notamment la fréquence des processeurs ainsi que la bande-passante, la résolution et la fréquence d'acquisition des accéléromètres intégrés. Morgenthal montre que les capacités des téléphones augmentent avec le temps et qu'elles sont généralement compatibles avec l'estimation de la tension mécanique dans les haubans.

Tableau 2.1 Tableau comparatif des caractéristiques de certains téléphones intelligents [11]

Model	Year	Processor	Camera	Sensor type	R	Δa	$f_{s,max}$
		(Ghz)	(megapixel)	(vendor)	(g)	(mm/s ²)	(Hz)
HTC Legend	2010	0.6	5	-	± 2	27	50
Motorola Milestone 2	2010	1.0	5	LIS331DLH ¹	± 8	10	107
Nexus 4 (LG)	2012	1.5	8	LGE ²	± 4	1	200
Nexus 7 (Asus)	2012	1.5	1.2	MPL ²	± 4	1	200
Nexus 9 (HTC)	2014	2.3	8	- ³	± 4	10	100
Sony Xperia Z3	2014	2.5	20.7	BMA2X2 ⁴	± 4	19	200
LG G3	2014	2.5	13	LGE ²	± 4	1	120
Samsung Galaxy A3	2014	1.2	8	BMC150 ⁴	± 4	19	100
Samsung Galaxy S5 mini	2014	1.4	8	MPL ²	± 2	4	200
Huawei Y6	2015	1.1	8	LIS3DH ¹	± 16	10	100
Huawei GX8	2015	1.5 + 1.2	13	LIS3DH ¹	± 16	10	100
Xiaomi Redmi Note 3	2015	1.4 + 1.8	13	LSM6DS3 ¹	± 4	1	200
Samsung Galaxy S6	2015	2.1 + 1.5	16	MPU6500 ²	± 4	1	200
Sony Xperia Z5	2015	2.0 + 1.5	23	- ²	± 4	4	225
Wiko Lenny 3	2016	1.3	8	- ⁵	± 4	4	100
CAT S60	2016	1.5	13	LSM6DS3 ¹	± 8	1	100
Samsung Galaxy S7 Edge	2016	1.6 + 2.3	12	K6DS3TR ¹	± 8	2	200

¹ STMicroelectronics, Geneva

² InvenSense, San Jose, CA

³ HTC Group, Ltd., Watford, UK

⁴ Bosch Sensortec, Reutlingen, Germany

⁵ MTK

2.2.3 Applications mobiles existantes

Deux applications mobiles permettant d'estimer la tension dans les haubans des ponts grâce à la méthode de vibration sont disponibles dans la littérature : une application Android [11] et une application iOS [10, 12]. Cette section vise à décrire ces applications et à donner des pistes d'amélioration.

L'application iOS est nommée Orion-CC et est disponible sur l'App Store. Son interface (voir figure 2.4) présente 3 fonctions principales : localisation, acquisition de données et analyse des données. L'acquisition des données peut se faire à l'aide de l'accéléromètre, du gyroscope ou des deux capteurs combinés. Lors des réglages, l'utilisateur doit définir le nom du fichier, la durée et la fréquence d'acquisition. Il est également possible de prendre une photo, définir une accélération maximale et commencer l'acquisition automatiquement. L'analyse des données

permet d'obtenir la tension mécanique dans un hauban : à partir d'un fichier de données, la fonction effectue une transformation de Fourier rapide (en anglais Fast Fourier Transform, abrégé par la suite FFT), demande à l'utilisateur de sélectionner les pics d'accélération "à la main" puis calcule la tension grâce à la formule de la corde vibrante définie à la section 2.4.2. Un des avantages de cette application est qu'elle peut fonctionner en mode synergique, ce qui permet de synchroniser plusieurs téléphones intelligents équipés d'Orion-CC afin de multiplier la quantité de données recueillis et améliorer la précision de l'estimation. Sa limitation principale est la formule choisie pour relier les fréquences naturelles et la tension mécanique. Cette formule est très simple et n'est valable que dans certaines configurations particulières.

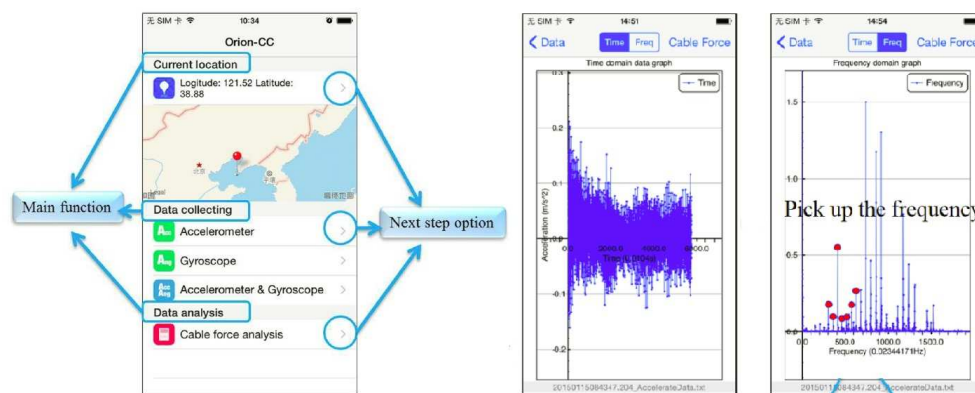


Figure 2.4 Interface de l'application Orion-CC [10]

L'interface de l'application Android est présentée à la figure 2.5. L'application possède les mêmes fonctions qu'Orion-CC (localisation, acquisition de données et analyse des données). Cependant, quelques améliorations sont proposées. Il est possible de télécharger dans l'application un fichier Excel contenant les noms et paramètres des câbles analysés plutôt que de rentrer les paramètres manuellement. De plus, la sélection des pics du spectre de Fourier se fait avec une méthode semi-automatique de sélection des pics. Enfin, l'estimation de la tension mécanique peut se faire soit en utilisant la formule de la corde vibrante, soit en sauvegardant dans l'application les relations tension - fréquences naturelles issues d'une analyse numérique non linéaire préalable. Ceci permet une précision maximale. Cependant, les relations tension - fréquences naturelles sont propres à un seul câble et sont longues à obtenir. Cette méthode n'est pas envisageable dans le cas d'une utilisation rapide et répétée de l'application.

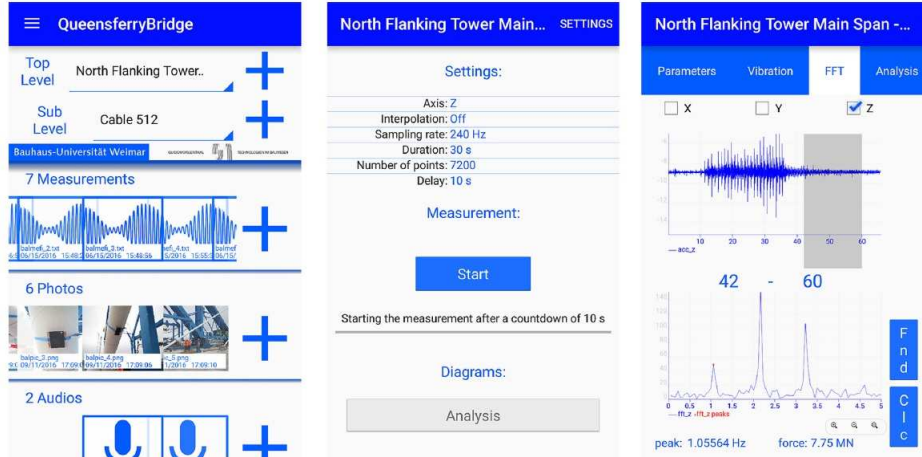


Figure 2.5 Interface de l'application Android [11]

L'étude des deux applications disponibles dans la littérature met en lumière les deux principaux axes d'amélioration. Les deux applications utilisent la méthode de sélection des pics et calculent la tension mécanique dans le câble avec la formule de la corde vibrante. Cependant, il existe beaucoup d'autres méthodes d'analyse modale et de méthodes reliant les fréquences naturelles à la tension. Une étude approfondie des différents choix sera effectuée dans les deux prochaines sections. L'objectif est de trouver un compromis entre facilité d'utilisation et précision de l'estimation.

2.3 Méthodes d'analyse modale

2.3.1 Classification des techniques d'analyse modale

L'analyse modale permet de déterminer différents paramètres caractéristiques du comportement dynamique d'une structure : fréquences naturelles, amortissements et modes de vibration. Les paramètres nous intéressant dans le cadre de la méthode de vibration sont les fréquences naturelles.

Il existe deux grandes classes de techniques d'analyse modale : théorique et expérimentale. Les analyses théoriques supposent que la matrice de rigidité \mathbf{K} , la matrice de masse \mathbf{M} et la matrice d'amortissement \mathbf{C} de la structure sont connues. L'analyse est alors ramenée à un problème aux valeurs propres [13]. Par exemple, lorsque $\mathbf{C} = \mathbf{0}$:

$$\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0 \quad (2.1)$$

Ce type d'analyse est utilisé par les logiciels de calcul par éléments finis par exemple. Comme les différentes matrices de la structure ne sont pas connues, ce sont les techniques expérimentales qui nous intéressent ici. Celles-ci sont caractérisées par trois critères principaux :

- domaine d'analyse : domaine du temps ou domaine des fréquences ;
- nombre de degrés de liberté (DDL) : un ou plusieurs ;
- nombre d'intrants et de sorties : un seul intrant et une seule sortie, un seul intrant et plusieurs sorties, plusieurs intrants et une seule sortie, plusieurs intrants et plusieurs sorties, sortie(s) seulement ...

En particulier, c'est une sous-branche de l'analyse modale expérimentale nommée analyse modale opérationnelle qui nous intéresse. Il s'agit de déterminer les paramètres modaux d'une structure en conditions réelles - et non en laboratoire. Une revue approfondie de ces techniques est faite par Reynders [14]. Dans le cas des haubans des lignes de transmission, les sorties se limitent à un signal d'accélération en un point du câble selon les 3 directions de l'espace. Par ailleurs, les signaux qui excitent la structure (vent, trafic routier) ne sont pas connus, ce qui est courant en génie civil. Ainsi, les techniques opérationnelles qui nous intéressent sont celles nécessitant un nombre faible de DDL et de type sortie seulement.

La classification des techniques d'analyse modale expérimentales est résumée à la figure 2.6.

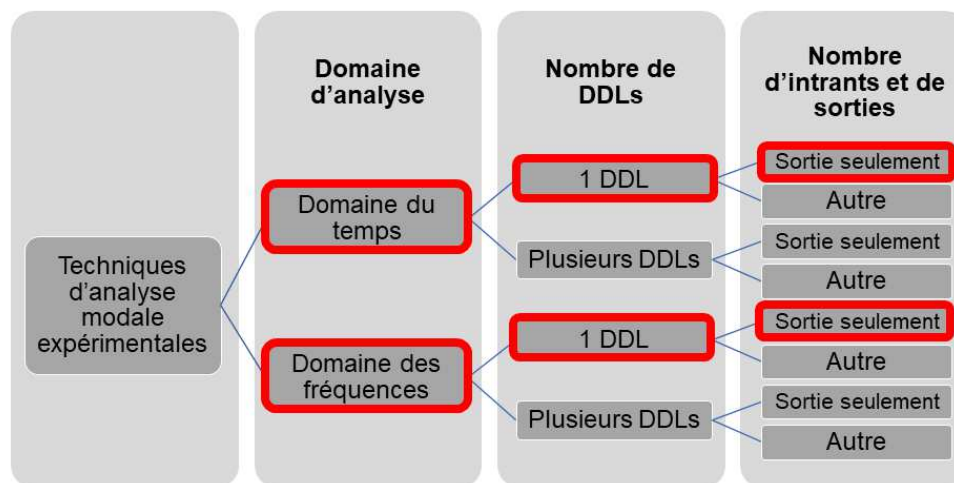


Figure 2.6 Classification des techniques d'analyse modale expérimentales

2.3.2 Description des méthodes applicables aux haubans

Cette section présente une liste exhaustive des méthodes d'analyse modale expérimentales applicables aux haubans.

Domaine des fréquences

L'approche classique est la méthode de sélection des pics (en anglais Peak-Picking, abrégé par la suite PP) [15]. Le signal d'accélération du câble en un point en fonction du temps est transformé dans le domaine des fréquences avec une transformée de Fourier. L'algorithme FFT est généralement choisi puisqu'il est plus rapide en temps de calcul que la Transformation de Fourier Discrète (TFD) - complexité en $O(n \log n)$ pour la FFT contre $O(n^2)$ pour la TFD. Le spectre de Fourier obtenu comporte généralement du bruit. Il faut donc mettre en place une méthode permettant d'isoler les pics du spectre : il s'agit du PP. Il est possible de sélectionner les pics à la main mais ceci est fastidieux. Pour automatiser cette tâche, deux étapes sont requises : isoler les pics de grande amplitude (figure 2.7b) puis conserver seulement le pic dominant dans chaque groupe de pic (figure 2.7c). Les abscisses des pics obtenus correspondent aux fréquences naturelles du câble. L'avantage de cette méthode est sa simplicité d'utilisation et sa rapidité. Cependant, le résultat dépend de la résolution sur les fréquences. Pour une résolution trop faible, deux modes proches ne peuvent pas être distingués. Une amélioration de cette méthode est proposée par Brincker [16] : la décomposition dans le domaine des fréquences (en anglais Frequency Domain Decomposition, abrégé par la suite FDD). Le principe est de décomposer la matrice de densité spectrale en valeurs singulières afin de se ramener à un système à un DDL. Cette méthode n'a d'intérêt que si l'accélération du câble est enregistrée en plusieurs DDL.

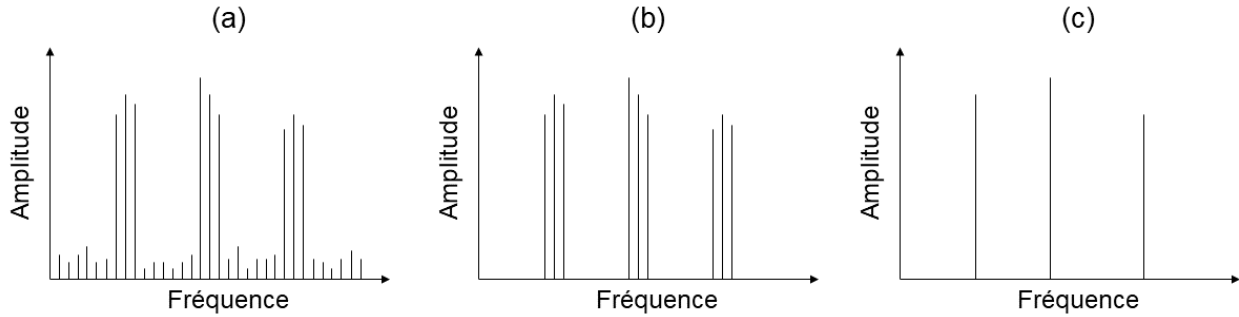


Figure 2.7 Étapes de la méthode de sélection des pics : (a) Spectre comportant du bruit ; (b) Isolation des pics de grande amplitude ; (c) Isolation des pics dominants de chaque groupe [8]

Domaine du temps

Dans le domaine du temps, la méthode de diminution aléatoire (en anglais Random Decrement, abrégé par la suite RD) proposée par Ibrahim [17] est la plus simple. Elle repose sur l'estimation de la fonction RD et le calcul de sa moyenne. Cette méthode basique donne seulement la fréquence fondamentale. Cependant, elle sert à l'implémentation d'une méthode plus avancée également proposée par Ibrahim [18] : le domaine temporel d'Ibrahim (en anglais Ibrahim Time Domain, abrégé par la suite ITD). L'ITD permet de ramener l'estimation des fréquences naturelles d'une structure à un problème aux valeurs propres plus simple. Sa principale limitation est l'existence de modes fictifs dus au bruit et/ou aux irrégularités du signal. L'ITD est modernisée en 1994 par Juang [19] avec la méthode de réalisation avec corrélation de données (en anglais Eigensystem Realization Algorithm with Data Correlation, abrégé par la suite ERA/DC). Plus efficace, cette méthode souffre toutefois des mêmes limitations et nécessite de nombreuses interventions de l'utilisateur.

En 1996, Van Overschee propose une nouvelle méthode [20] : l'identification stochastique par sous-espaces (en anglais Stochastic Subspace Identification, abrégé par la suite SSI). Les fréquences naturelles de la structures sont reliées aux valeurs propres de la matrice d'état d'un modèle espace-état stochastique décrivant le système. Le modèle espace-état est de la forme suivante :

$$\dot{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (2.3)$$

avec \mathbf{x} le vecteur d'état, \mathbf{y} le vecteur des observations, \mathbf{A}_d la matrice d'état, \mathbf{B}_d la matrice

d'expansion de l'excitation, \mathbf{C}_d la matrice de sortie, \mathbf{D}_d la matrice de l'excitation extérieure, \mathbf{w} l'incertitude du procédé et \mathbf{v} l'incertitude de l'observation. Pour déterminer la matrice d'état, il existe deux sous-méthodes : l'identification stochastique par sous-espaces fondée sur les données (en anglais Data-driven Stochastic Subspace Identification, abrégé par la suite SSI-DATA) et l'identification stochastique par sous-espaces fondée sur les covariances (en anglais Covariance-driven Stochastic Subspace Identification, abrégé par la suite SSI-COV). Celles-ci permettent d'obtenir un diagramme de stabilisation en fréquence. Il faut alors utiliser un algorithme de classification hiérarchique [21] pour obtenir les fréquences naturelles. Un exemple est présenté dans la thèse de Haji Agha Mohammad Zarbaf publiée en 2018 [22].

Parmi les méthodes les plus récentes, Kim propose la décomposition dans le domaine temporel (en anglais Time Domain Decomposition, abrégé par la suite TDD) [23]. Fondé sur la séparation de la solution en fonctions du temps seulement et de l'espace seulement, le TDD est une méthode directe et rapide dont l'avantage principal réside dans la gestion d'un grand nombre de sorties. L'idée étant de se limiter à un ou deux téléphones intelligents, cette méthode ne nous intéresse pas pour les haubans des lignes de transmission.

Un récapitulatif des méthodes d'analyse modale expérimentales applicables aux haubans des lignes de transmission est donné dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Méthodes d'analyse modale expérimentales applicables aux haubans

Domaine d'étude	Nom & Référence
Domaine des fréquences	Nom : Sélection des pics Référence : Bendat et Piersol, 1980 [15]
	Nom : Décomposition dans le domaine des fréquences Référence : Brincker, Zhang et Andersen, 2001 [16]
Domaine du temps	Nom : Diminution aléatoire Référence : Ibrahim, 1977 [17]
	Nom : Domaine temporel d'Ibrahim Référence : Ibrahim, 1977 [18]
	Nom : Méthode de réalisation avec corrélation de données Référence : Juang, 1994 [19]
	Nom : Identification stochastique par sous-espaces Référence : Van Overschee et De Moor, 1996 [20]
	Nom : Décomposition dans le domaine du temps Référence : Kim, Stubbs et Park, 2005 [23]

2.4 Calcul de la tension d'un câble à partir de ses fréquences naturelles

Dans toute la suite, le câble incliné est décrit en utilisant les notations de la figure 2.8 :

- θ : angle d'inclinaison par rapport à l'horizontal ;
- L : distance horizontale entre les deux points d'attache ;
- d_v : distance verticale maximale entre le câble et la corde ;
- $\delta = \frac{d_v}{L}$: ratio flèche-portée ;
- T : tension mécanique dans le câble ;
- H : composante horizontale constante de la tension.

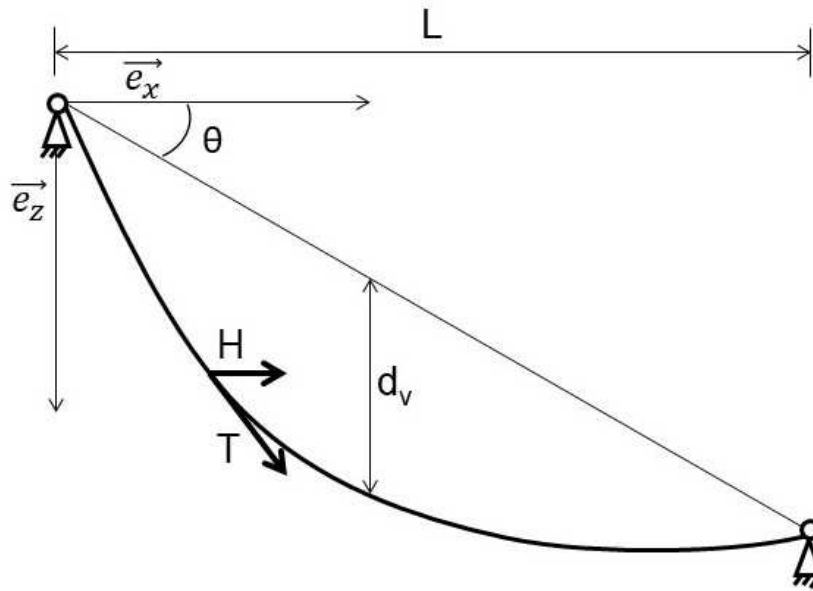


Figure 2.8 Schéma d'un câble incliné statique

2.4.1 Équation dynamique du mouvement d'un câble

Pour réaliser la troisième et dernière étape de la méthode de vibration (voir section 2.2.1), il est crucial de bien choisir le modèle mathématique reliant les fréquences naturelles du câble à la tension mécanique. Tous les modèles ont le même point de départ : l'équation dynamique du mouvement d'un câble.

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - T_* \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - h(t) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.4)$$

$w(x,t)$ est la composante verticale du mouvement du câble dans le plan, $T_* = H \sec \theta$ est la composante de la tension horizontale parallèle à la corde, $h(t)$ est la tension additionnelle due

au mouvement, EI est la rigidité flexionnelle et m est la masse linéique. Le développement permettant d'aboutir à cette équation est détaillé par Ricciardi [24]. Les hypothèses suivantes sont faites : (i) le câble est de section constante ; (ii) les conditions aux frontières ne varient pas ; (iii) il n'y a pas d'attache extérieure.

L'équation dynamique du mouvement ne possède pas de solution analytique simple : elle nécessite certaine(s) approximation(s) pour être résolue. Deux approches sont généralement proposées : des formules simples et pratiques qui permettent à l'ingénieur d'implémenter facilement la solution (sections 2.4.2, 2.4.3, 2.4.4 et 2.4.5) ; une résolution numérique plus coûteuse en temps de calcul mais plus précise (section 2.4.6). Dans la suite de cette section, les deux approches et leurs approximations sont étudiées. À noter qu'il existe déjà dans la littérature scientifique des comparaisons de différentes formules pratiques [22, 25]. Le but ici est d'étendre cette étude et de l'appliquer au cas des haubans des lignes de transmission.

2.4.2 Théorie de la corde vibrante

Le modèle le plus simple reliant la tension mécanique dans le câble à ses fréquences naturelles est la théorie de la corde vibrante. Son extensibilité (ou sa flèche) et sa rigidité flexionnelle sont négligées. L'équation du mouvement devient alors :

$$-T_{\star} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.5)$$

Cette équation peut être résolue pour obtenir T_{\star} en fonction des fréquences de vibration f_n :

$$T_{\star} = 4mL_{\star}^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 \quad (2.6)$$

où $L_{\star} = L \sec \theta$ est la longueur de la corde.

Ce modèle est très simple et permet d'obtenir une approximation rapide de la tension mécanique. Cependant, il n'est pas valable pour des câbles ayant une grande extensibilité et/ou une rigidité flexionnelle importante. À titre de rappel, l'équation (2.6) correspond à la formule (1.1) utilisée pour la méthode du retour.

2.4.3 Câble non-extensible

Une manière de raffiner le modèle de la corde vibrante est de prendre en compte la rigidité flexionnelle EI tout en négligeant l'extensibilité du câble ($\delta \ll 1$). L'équation du mouvement est alors :

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - T_\star \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.7)$$

Wei-Xin Ren [26] propose des formules pratiques pour deux types de conditions aux limites. Lorsque le câble est simplement supporté aux deux extrémités, c'est le cas d'une poutre chargée axialement. Ceci donne :

$$T_\star = 4mL_\star^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{EI}{L_\star^2} (n\pi)^2 \quad (2.8)$$

Ce modèle est encore trop éloigné de la réalité puisque les câbles ne sont pas simplement supportés en général. Lorsque le câble est fixe aux deux extrémités, l'équation du mouvement peut être transformée en une équation transcendantale sur les pulsations naturelles :

$$2(\alpha L_\star)(\beta L_\star) [1 - \cos(\alpha L_\star) \cosh(\beta L_\star)] + [(\beta L_\star)^2 - (\alpha L_\star)^2] \sin(\alpha L_\star) \sinh(\beta L_\star) = 0 \quad (2.9)$$

où α et β dépendent de ω . Ren propose une solution simple pour l'équation transcendantale dépendant des valeurs de $\xi_f = L_\star \sqrt{T_\star/EI}$, un paramètre adimensionnel quantifiant la rigidité flexionnelle :

$$\begin{cases} T_\star = 3.432mL_\star^2 f_0^2 - 45.191 \frac{EI}{L_\star^2} & 0 \leq \xi_f \leq 18 \\ T_\star = m \left(2L_\star f_0 - \frac{2.363}{L_\star} \sqrt{\frac{EI}{m}} \right)^2 & 18 < \xi_f \leq 210 \\ T_\star = 4mL_\star^2 f_0^2 & 210 < \xi_f \end{cases} \quad (2.10)$$

Lorsque ξ_f est grand, la rigidité flexionnelle peut être négligée, ce qui donne l'équation de la corde vibrante (2.6). La solution simple est ensuite comparée avec une solution numérique précise qualifiée d'exacte. L'erreur maximale faite en choisissant la solution simple à la place de la solution "exacte" est de 0,95%. Cette erreur est obtenue lorsque $\xi_f = 18$. En résumé, dans le cas où l'extensibilité est négligée, la formule proposée par Ren peut être appliquée avec une précision supérieure à 99%.

Ceballos [27] propose une autre formule simple négligeant l'extensibilité du câble. Considérant que les conditions aux limites réelles du câble ne sont ni simplement supportées ni fixes mais quelque part entre les deux, il tient compte d'une certaine rigidité rotationnelle du câble à

ses extrémités k_A et k_B .

$$\omega_n = \frac{n\pi - \theta_n}{L_\star} \sqrt{\frac{T_\star}{m}} \sqrt{1 + \beta^2 (n\pi - \theta_n)^2} \quad (2.11)$$

avec $\beta = \frac{1}{L_\star} \sqrt{\frac{EI}{T_\star}}$. Comme θ_n dépend de k_A , k_B et ω_n alors ω_n est calculé en utilisant un processus itératif. En plus de cette formule, Ceballos propose une méthode expérimentale permettant de déterminer les rigidités rotationnelles aux extrémités : à partir du numéro du plus faible mode présentant un noeud de vibration à la position du capteur, k_A et k_B peuvent être déterminés graphiquement. L'auteur précise également que si le câble est excité par une impulsion normale au plan, l'approximation de non-extensibilité n'entraîne aucune erreur.

2.4.4 Câble sans rigidité flexionnelle

Une autre manière de raffiner le modèle de la corde vibrante est de prendre en compte l'extensibilité du câble tout en négligeant la rigidité flexionnelle EI . L'équation du mouvement est désormais :

$$-T_\star \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - h(t) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.12)$$

Ren [26] ajoute l'hypothèse que le câble est horizontal et que le ratio flèche-portée δ est inférieur à $1/8$. Ceci permet de transformer l'équation du mouvement précédente en deux équations : (2.13) décrit les pulsations naturelles des modes antisymétriques, (2.14) décrit les pulsations naturelles des modes symétriques.

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{L} \sqrt{\frac{H}{m}} \quad (2.13)$$

$$\tan\left(\frac{\beta L}{2}\right) = \frac{\beta L}{2} - \frac{4}{\lambda^2} \left(\frac{\beta L}{2}\right)^3 \quad (2.14)$$

où $\beta^2 = \frac{m\omega^2}{H}$ et $\lambda^2 = \left(\frac{mgL}{H}\right)^2 \frac{EAL}{HL_e}$ est un paramètre adimensionnel quantifiant l'extensibilité du câble. De la même façon qu'à la section 2.4.3, Ren propose une solution simple pour la pulsation fondamentale dépendant du paramètre λ^2 . L'erreur maximale faite en choisissant cette solution à la place de la solution numérique "exacte" est inférieure à 1%.

$$\begin{cases} H = 4mL^2 f_0^2 & \lambda^2 \leq 0.17 \\ H = [mL^2(4f_0^2 H^2 - 7.569mEA)]^{1/3} & 0.17 < \lambda^2 < 4\pi^2 \\ H = mL^2 f_0^2 & 4\pi^2 \leq \lambda^2 \end{cases} \quad (2.15)$$

Lorsque $\lambda^2 < 4\pi^2$, le mode fondamental est symétrique alors que lorsque $\lambda^2 \geq 4\pi^2$, le mode fondamental est antisymétrique. De plus, lorsque λ^2 est petit, l'extensibilité peut être négligée, ce qui donne l'équation de la corde vibrante (2.6). Les haubans des lignes de transmission vérifient bien l'hypothèse $\delta < 1/8$. Cependant, ils ne sont pas horizontaux. Il faut donc généraliser le résultat précédent en remplaçant H par T_* , L par L_* et λ^2 par $\lambda_*^2 = \left(\frac{mgL_* \cos \theta}{T_*}\right)^2 \frac{EAL_*}{HL_{e*}}$ [28].

Nam et Nghia [29] proposent une méthode similaire. En partant de l'équation générale du mouvement pour un câble incliné (2.4), seule l'hypothèse $\delta < 1/8$ est considérée pour aboutir à deux équations pour les modes antisymétriques et symétriques. Ces équations sont simplifiées en ajoutant l'hypothèse $\epsilon = EI/T_*L_*^2 \ll 1$, ce qui revient à négliger la rigidité flexionnelle. Ensuite, les équations peuvent être résolues numériquement ou une solution simple peut être proposée. Ce travail n'est pas présenté dans l'article.

2.4.5 Prise en compte de l'extensibilité et de la rigidité flexionnelle

Les sections précédentes présentent des formules simples facilement utilisables mais qui nécessitent de négliger l'extensibilité du câble ou sa rigidité flexionnelle. Cependant, il existe d'autres formules simples qui tiennent compte à la fois de EI et de d_v .

Ricciardi [24] propose une transformation de l'équation générale (2.4) en deux équations transcendentales : une pour les modes antisymétriques (2.16) et une pour les modes symétriques (2.17).

$$\frac{\hat{\alpha}(\hat{\omega})}{\hat{\beta}(\hat{\omega})} = \frac{\tan(\hat{\alpha}(\hat{\omega})/2)}{\tanh(\hat{\beta}(\hat{\omega})/2)} \quad (2.16)$$

$$\frac{\hat{\omega}^2}{\lambda^2} = \xi_f^2 \left\{ 1 - \frac{2(\hat{\beta}/\hat{\alpha} + \hat{\alpha}/\hat{\beta})}{\hat{\alpha} \cotanh(\hat{\beta}/2) + \hat{\beta} \cotan(\hat{\alpha}/2)} \right\} \quad (2.17)$$

avec $\hat{\alpha}(\hat{\omega}) = \sqrt{\sqrt{\left(\frac{\xi_f^2}{2}\right)^2 + \hat{\omega}^2} - \frac{\xi_f^2}{2}}$ et $\hat{\beta}(\hat{\omega}) = \sqrt{\sqrt{\left(\frac{\xi_f^2}{2}\right)^2 + \hat{\omega}^2} + \frac{\xi_f^2}{2}}$. Cependant, ces équations n'ont pas de solution analytique exacte et l'auteur propose une résolution numérique (voir section 2.4.6).

Mehrabi [30] propose une formulation de différences finies générale pour un câble horizontal sans hypothèse restrictive, ainsi qu'une formulation de différences finies adimensionnelle qui

fait l'hypothèse d'un profil parabolique. D'après Irvine [28], cette hypothèse est équivalente à $\delta < 1/8$. À partir de la formulation adimensionnelle, Mehrabi propose la formule simple suivante :

$$\frac{\omega_n}{\omega_{ns}} = \alpha\beta_n - 0.24\frac{\mu}{\xi_f} \quad (2.18)$$

où $\alpha = 1 + 0.039\mu$, $\beta_n = 1 + \frac{2}{\xi_f} + \frac{4+n^2\pi^2/2}{\xi_f^2}$, $\mu = \begin{cases} \lambda^2 & \text{pour } n = 1 \\ 0 & \text{pour } n > 1 \end{cases}$, $\omega_{ns} = \frac{n\pi}{L^2}\sqrt{\frac{H}{m}}$ et ξ_f et λ^2 sont les paramètres adimensionnels définis aux sections 2.4.3 et 2.4.4. L'erreur maximale faite par rapport à une solution numérique issue de la méthode des différences finies générale est de 0,35%. Comme à la section 2.4.4, cette solution peut être généralisée à un câble incliné [28].

Zui [31] propose une généralisation de la formule de Wei-Xin Ren (2.10). À partir de l'équation générale du mouvement pour un câble incliné (2.4), l'extensibilité est négligée pour aboutir à l'équation transcendante (2.9). Une solution simple est proposée puis elle est généralisée à des câbles d'extensibilité non négligeable en introduisant le paramètre $\Gamma = \sqrt{\frac{mgL_\star}{128EA\delta^3 \cos^5 \theta} \frac{0.31\xi_f + 0.5}{0.31\xi_f - 0.5}}$. L'erreur maximale liée à cette solution par rapport à la solution exacte de l'équation transcendante est de 0,4%. Rappelons que la solution "exacte" correspond à une solution numérique précise.

$$\text{Lorsque } \Gamma \geq 3, \quad \begin{cases} T_\star = 4m(f_1 L_\star)^2 [1 - 2.20(C/f_1) - 0.550(C/f_1)^2] & 17 \leq \xi_f \\ T_\star = 4m(f_1 L_\star)^2 [0.865 - 11.6(C/f_1)^2] & 6 \leq \xi_f \leq 17 \\ T_\star = 4m(f_1 L_\star)^2 [0.828 - 10.5(C/f_1)^2] & 0 \leq \xi_f \leq 6 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\text{Lorsque } \Gamma \leq 3, \quad \begin{cases} T_\star = m(f_2 L_\star)^2 [1 - 4.40(C/f_2) - 1.10(C/f_2)^2] & 60 \leq \xi_f \\ T_\star = m(f_2 L_\star)^2 [1 - 6.33(C/f_2) - 1.58(C/f_2)^2] & 17 \leq \xi_f \leq 60 \\ T_\star = m(f_2 L_\star)^2 [0.882 - 85.0(C/f_2)^2] & 0 \leq \xi_f \leq 17 \end{cases} \quad (2.20)$$

Fang [32] propose également une formule simple tenant compte à la fois de la rigidité flexionnelle et de l'extensibilité. Comme précédemment, l'extensibilité est tout d'abord négligée pour arriver à l'équation transcendante (2.9). Cette équation est ensuite transformée en posant $\gamma = \alpha L_\star$ et $\chi = \beta L_\star$ pour aboutir à

$$T_\star = 4\pi^2 m L_\star^2 \left(\frac{f_n}{\gamma_n} \right)^2 - \frac{EI}{L_\star^2} \gamma_n^2 \quad (2.21)$$

Fang ajoute l'hypothèse que γ_n varie quadratiquement selon $\Psi_n = \sqrt{EI/m\omega_n^2 L_*^4}$:

$$\gamma_n = n\pi + A_n \Psi_n + B_n \Psi_n^2 \quad (2.22)$$

L'équation (2.21) a été établie en négligeant δ . Cependant, elle reste valable pour le premier mode lorsque $\Gamma \geq 3$ et pour le second mode quelque soit Γ , Γ étant le paramètre adimensionnel défini au paragraphe précédent. L'erreur maximale commise en appliquant cette méthode au lieu de la solution "exacte" de l'équation transcendante est de 1,07%. Cette erreur est obtenue pour le premier mode.

Le tableau 2.3 récapitule les formules simples et pratiques disponibles dans la littérature. Deux approches sont proposées pour obtenir de telles formules : analytique et numérique. La première approche consiste à faire suffisamment d'hypothèses pour rendre l'équation dynamique du mouvement résoluble analytiquement. L'autre approche consiste à faire une résolution numérique précise et coûteuse de l'équation dynamique puis trouver des formules simples qui approximent la solution numérique.

Tableau 2.3 Formules pratiques reliant la tension dans un câble à ses fréquences naturelles

Méthode	Hypothèse(s)	Formule pratique	Résolution
Corde vibrante	Pas d'extensibilité Pas de rigidité flexionnelle	(2.6)	Analytique
Poutre chargée axialement	Pas d'extensibilité Câble simplement supporté	(2.8)	Analytique
Ren 2005 (1)	Pas d'extensibilité Câble fixe aux extrémités	(2.10)	Numérique
Ceballos 2008	Pas d'extensibilité	(2.11)	Numérique
Ren 2005 (2)	Pas de rigidité flexionnelle Câble horizontal et $\delta < 1/8$	(2.15)	Numérique
Mehrabi 1998	Câble horizontal $\delta < 1/8$, $\xi_f > 50$, $\lambda^2 < 3,1$	(2.18)	Numérique
Zui 1996	-	(2.19), (2.20)	Numérique
Fang 2012	-	(2.21)	Numérique

2.4.6 Résolution numérique

Une alternative à l'utilisation de formules pratiques est la résolution numérique. Celle-ci peut prendre plusieurs formes :

- résolution numérique des équations transcendantes ;

- méthode des différences finies ;
- méthode des éléments finis.

La résolution numérique des équations transcendantales consiste à utiliser une méthode d'optimisation telle que l'algorithme de Newton-Raphson. Un travail préalable sur l'intervalle des solutions doit généralement être effectué. Il est également à noter que les méthodes d'optimisation sont généralement sensibles au point de recherche initial. D'autre part, Dan [33] montre que l'erreur commise par ces algorithmes peut être quantifiée en fonction de ξ_f et λ^2 , ce qui permet de corriger les résultats.

La méthode des différences finies proposée par Mehrabi [30] ne fonctionne que dans le cas d'un câble horizontal, ce qui ne correspond pas au cas des haubans des lignes de transmission. En revanche, Bouaanani [34] propose une formulation de différences finies tenant compte de l'inclinaison des câbles, de la déformation des sections et de la non-linéarité des matériaux. Il améliore ensuite ce modèle en ajoutant les effets thermiques [35].

Enfin, la méthode des éléments finis est la méthode la plus précise mais aussi la plus coûteuse en temps de calcul. Elle peut être appliquée directement en modélisant le câble étudié à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis tel qu'ADINA, ABAQUS, SAP2000 ... Cependant, les valeurs précises de la rigidité axiale EA et de la rigidité flexionnelle EI sont rarement connues. Kim [36] propose de déterminer par itération H , EA et EI . À chaque itération, un modèle éléments finis est construit et les valeurs de H , EA et EI sont mises à jour. Cette méthode est très puissante mais elle demande une implémentation bien trop compliquée et un temps de calcul bien trop grand pour pouvoir être appliquée à un grand nombre de câbles. Elle ne pourra donc pas être utilisée dans le cas des haubans des lignes de transmission.

2.5 Conclusion

La revue de littérature approfondie présentée dans ce chapitre montre la faisabilité du développement d'une nouvelle technique pour déterminer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission en utilisant les téléphones intelligents. Cette technique, basée sur la méthode de vibration, nécessite le développement d'une application mobile et la création d'un dispositif d'attache pour fixer le téléphone intelligent au hauban. Deux applications mobiles sont aujourd'hui disponibles dans la littérature. Cependant, ces applications visent à estimer la tension mécanique dans les haubans de ponts et ne sont pas adaptées aux haubans

des lignes de transmission. Le présent chapitre permet aussi de mettre en lumière les trois axes d'étude principaux à prendre en compte lors du développement du nouvel outil. Tout d'abord, il est nécessaire de choisir une méthode d'analyse modale adaptée et de déterminer le modèle reliant tension et fréquences naturelles offrant le meilleur compromis entre facilité d'utilisation et précision des résultats. Ensuite, il s'agit de choisir un téléphone intelligent adapté, c'est-à-dire un téléphone avec un accéléromètre et un processeur performants, un espace de stockage suffisant et une bonne résistance aux conditions extrêmes. Enfin, il faut implémenter une procédure d'acquisition en tenant compte de la fixation du téléphone intelligent, de sa position, du type d'excitation, de la durée d'acquisition et de la fréquence d'acquisition.

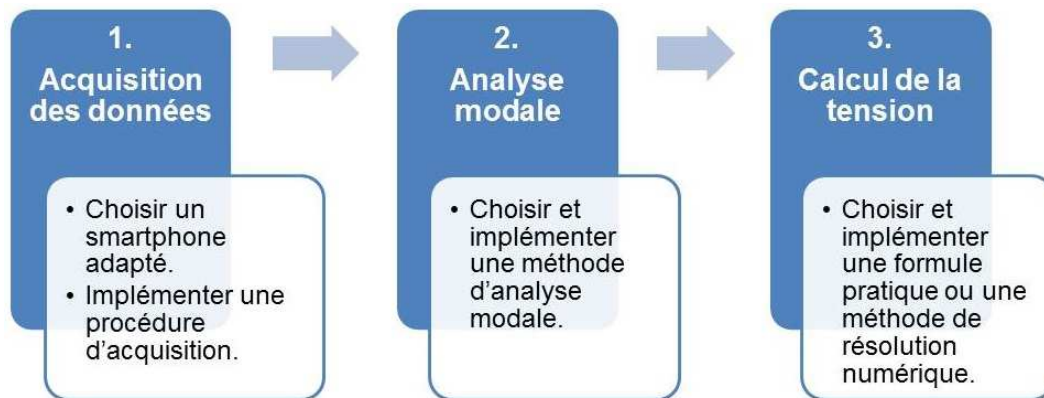


Figure 2.9 Travail à réaliser pour chaque étape de la méthode de vibration

La figure 2.9 résume le travail qu'il faudra réaliser pour chaque étape de la méthode de vibration.

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE TECHNIQUE PERMETTANT DE MESURER LA TENSION MÉCANIQUE DANS LES HAUBANS DES LIGNES DE TRANSMISSION

3.1 Objectifs et méthodologie

La revue de littérature présentée au chapitre précédent a permis de comprendre comment mesurer la tension mécanique dans un câble à l'aide d'un téléphone intelligent. Afin de pouvoir appliquer cette technique aux haubans des lignes de transmission, il faut notamment déterminer la meilleure méthode d'analyse modale et la meilleure formule pratique permettant de calculer la tension mécanique à partir des fréquences naturelles. Pour cela, un modèle numérique dynamique est construit. Il s'agit d'un modèle éléments finis bâti avec le logiciel ADINA [37]. Il a pour but de reproduire numériquement la méthode de vibration. Le principe est d'appliquer le poids propre de manière statique puis de faire vibrer le câble en créant une impulsion proche du point d'ancrage inférieur. Ceci modélise le tiré-lâché réalisé par un utilisateur. Ensuite, l'accélération est mesurée en un point, ce qui reproduit l'enregistrement des vibrations avec l'accéléromètre d'un téléphone intelligent. Les données d'accélération collectées peuvent alors être traitées avec les différentes méthodes d'analyse modale et les différentes formules pratiques décrites dans la revue de littérature afin de choisir celles qui s'adaptent le mieux au cas qui nous intéresse. Par ailleurs, le modèle numérique permet aussi de reproduire la méthode du retour d'onde expliquée dans l'introduction (section 1.1). Le but est de critiquer cette méthode et de proposer des axes d'amélioration.

Pour aller plus loin, la théorie des câbles est aujourd'hui à un stade avancé. Grâce aux travaux de Saxon et Cahn [38], Irvine et Caughey [39] et Triantafyllou [40], les équations ont été dérivées pour différentes configurations de câble : statique ou dynamique, tendu ou extensible, horizontal ou incliné ... De plus, ces équations ont été validées par des essais expérimentaux. Par exemple, Davenport et Steels se sont intéressés au cas des haubans avec d'importants diamètres [41], Russel et Lardner se sont penchés sur les câbles élastiques [42] et Gu et Du ont étudié le comportement dynamique des haubans de ponts [43]. Cependant, la littérature scientifique présente peu d'études numériques poussées sur les câbles. Ainsi, l'autre objectif de ce chapitre est d'utiliser le modèle numérique développé pour faire une étude de sensibilité et étudier certains paramètres tel que l'amortissement.

Dans ce chapitre, des études préliminaires (section 3.2) précédant la construction du modèle

éléments finis (section 3.3) sont présentées. Ensuite, la section 3.4 décrit l'implémentation des trois méthodes d'analyse modale retenues. Enfin, les sections 3.5 et 3.6 présentent l'étude de sensibilité et les résultats.

3.2 Études préliminaires

Avant de construire le modèle numérique, des études préliminaires sont réalisées afin de mieux comprendre la problématique. Celles-ci se décomposent en études analytiques et essais en conditions réelles.

3.2.1 Études analytiques

Évolution de la force axiale dans le câble en fonction de l'inclinaison

L'objectif de cette première étude analytique est de comprendre l'écart entre la tension donnée par le PIAB et celle obtenue avec la méthode du retour d'onde. Pour cela, deux profils théoriques sont utilisés : le profil parabolique et l'équation de la chaînette. Ces profils donnent l'allure d'un câble, sa tension en tout point ainsi que sa flèche [44].

Le PIAB donne la valeur de la force axiale dans le câble en un point situé à environ 1 m du culot ou du manchon du hauban. Hors, la force axiale varie le long du câble si celui-ci est incliné, ce qui signifie que le résultat donné par le PIAB dépend de sa position. Au contraire, la méthode du retour d'onde donne une valeur globale pour le câble. Celle-ci correspond en fait à la composante de la tension horizontale parallèle à la corde. Elle est constante le long du câble. La différence entre la force axiale en un point T , la tension horizontale H et la tension donnée par la méthode du retour d'onde T_* est illustrée à la figure 3.1.

Considérons le cas idéal où le PIAB donne exactement la valeur de la tension mécanique à 1 m du point d'ancrage inférieur T_{1m} et la méthode du retour d'onde donne exactement la valeur de T_* . Afin de comprendre la différence intrinsèque entre les deux méthodes, l'écart entre T_{1m} et T_* est quantifié. Pour cela, un hauban typique d'Hydro-Québec ayant une longueur de 50 m, une masse linéique de 3,4 kg/m et un diamètre de 30 mm est considéré. L'inclinaison varie entre 0° (câble horizontal) et 85° (câble quasi-vertical). Pour chaque cas, les deux profils théoriques sont utilisés : une valeur de 30 kN pour T_* est imposée et les valeurs de T_{1m} données par le profil parabolique et l'équation de la chaînette sont récupérées. Les courbes des écarts relatifs entre T_* et T_{1m} sont affichées à la figure 3.2. Celles-ci ont la

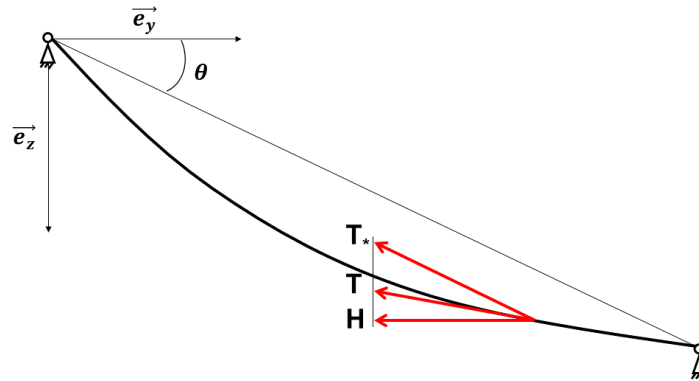


Figure 3.1 Différences entre T , H et T_*

même allure pour les deux profils théoriques. Pour une faible inclinaison, T_* et T_{1m} ont une valeur proche. En revanche, l'écart augmente avec l'inclinaison jusqu'à atteindre près de 3 % pour le cas quasi-vertical. L'inclinaison typique des haubans d'Hydro-Québec étant de 50° , un écart d'environ 2 % est attendu entre la tension donnée par le PIAB et celle obtenue avec la méthode du retour d'onde dans le cas idéal.

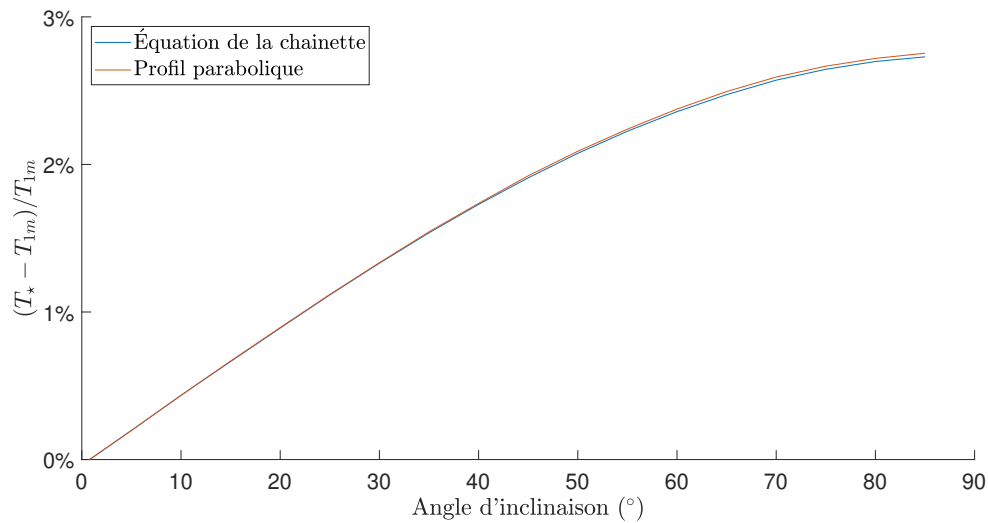


Figure 3.2 Écart intrinsèque entre les valeurs des tensions obtenues le PIAB et par la méthode du retour d'onde pour un câble typique d'Hydro-Québec

À noter que la méthode de vibration permet d'obtenir T_* . Par conséquent, un écart d'environ 2 % entre les résultats de la nouvelle technique et ceux du PIAB est également attendu.

Comparaison des formules reliant les fréquences naturelles à la tension

Le but de la seconde étude analytique est de comparer les formules reliant les fréquences naturelles à la tension dans le cas d'un hauban typique d'Hydro-Québec. Cette étude n'étant pas extensive, elle devra être confirmée à l'aide du modèle numérique. L'objectif principal ici est de critiquer la formule utilisée par Hydro-Québec pour la méthode du retour d'onde. Cette formule, écrite à la page 3, correspond à la théorie de la corde vibrante décrite dans la revue de littérature (section 2.4.2).

Comme lors de l'étude précédente, le câble choisi a une longueur de 50 m et une masse linéique de 3,4 kg/m. De plus, une inclinaison de 50° et une fréquence fondamentale de 1 Hz sont imposées. Six formules décrites dans la revue de littérature sont choisies : la corde vibrante, la poutre chargée axialement, la première méthode de Ren, la seconde méthode de Ren, la méthode de Mehrabi et la méthode de Zui. Pour rappel, les hypothèses de chaque formule et les équations correspondantes sont données dans le tableau 2.3. Ces formules sont implémentées à l'aide de Matlab. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Tensions mécaniques obtenues en appliquant différentes formules pour un câble typique d'Hydro-Québec

Méthode	Tension (kN)	Écart avec la formule de la corde vibrante (%)
Corde vibrante	34,290	-
Poutre chargée axialement	34,268	- 0,1 %
Ren 2005 (1)	33,163	- 3,3 %
Ren 2005 (2)	34,289	0,0 %
Mehrabi 1998	32,027	- 6,6 %
Zui 1996	33,080	- 3,5 %

Toutes les formules donnent des résultats proches. En particulier, la théorie de la corde vibrante, la poutre chargée axialement et la seconde méthode de Ren fournissent des résultats quasiment identiques. Les autres formules donnent des résultats un peu plus éloignés, l'écart relatif maximal avec la théorie de la corde vibrante étant de 6,6 % en valeur absolue. Étant donnée la précision de la méthode du retour d'onde, on peut considérer que le problème majeur ne vient pas de la formule choisie mais plutôt de l'erreur sur le temps chronométré. Concernant la méthode de vibration, un écart de plus de 6 % n'est pas acceptable. Il faut alors faire une étude approfondie en utilisant le modèle numérique pour savoir quelle formule choisir.

3.2.2 Essais en conditions réelles

Afin de donner les meilleurs résultats possibles, le modèle numérique doit être conforme aux haubans des lignes de transmission d'Hydro-Québec. Pour mieux appréhender la réalité, quatre campagnes d'essais en conditions réelles sont effectuées. Les trois premières sont celles effectuées par Hydro-Québec : essais sur un câble horizontal à l'IREQ, essais sur quatre haubans d'un pylône en V haubané situé à Terrebonne (Québec, Canada) en été, essais sur les mêmes haubans en hiver. La dernière campagne d'essais est réalisée à l'automne sur le même pylône de Terrebonne par Hydro-Québec et Polytechnique Montréal (figure 3.3).



Figure 3.3 Pylône en V haubané de Terrebonne (Photographie par Najib Bouaanani)

Dans un premier temps, les caractéristiques des câbles sont relevées. Celles-ci serviront de paramètres d'entrée pour le modèle numérique. Les haubans de Terrebonne sont schématisés à la figure 3.4. Ils sont numérotés de 1 à 4. Ils sont torsadés et composés de 28 brins. Ils ont un diamètre de 26,99 mm et une masse linéique de 3,429 kg/m. Ils sont inclinés de 56° par rapport à l'horizontal et sont connectés au même type d'ancrage au sol décrit à la section 3.3.1. Les quatre haubans sont seulement différenciés par leur longueur et la longueur de leur ancrage : 55,45 m, 52,58 m, 53,24 m, 54,56 m et 1,10 m, 1,35 m, 1,40 m, 1,46 m respectivement. Par ailleurs, le câble de l'IREQ a le même nombre de brins, le même diamètre et la même masse linéique. En revanche, il est horizontal, n'est pas connecté à un ancrage et a une longueur de 17,60 m.

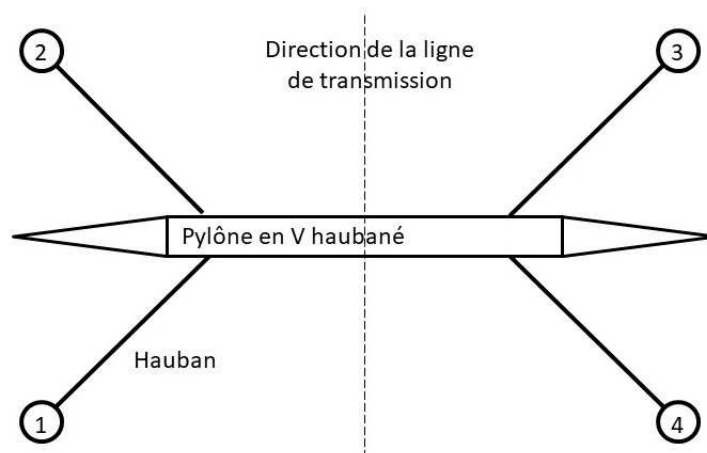


Figure 3.4 Schéma du pylône en V haubané de Terrebonne vu du dessus

Pour chaque campagne d'essais, des mesures sont effectuées à l'aide de la méthode du retour d'onde, du PIAB, d'un dynamomètre et/ou de la méthode de vibration. Les deux premières méthodes sont appliquées selon les principes détaillés dans la section 1.1 et le dynamomètre est installé à l'aide d'un système de palans de manière à reprendre la force axiale du câble (voir figure 3 de l'annexe C). Concernant la dernière méthode, les vibrations du câble sont enregistrées à l'aide de l'accéléromètre d'un téléphone intelligent (LG G4), les données sont exportées sur ordinateur et le traitement est fait à l'aide de Matlab. Celui-ci regroupe les algorithmes les plus simples : sélection des pics et formule de la corde vibrante. Ceci permet de se rendre compte de la faisabilité de la méthode de vibration. Les résultats sont listés dans le tableau 3.2. Les différentes valeurs serviront à calibrer le modèle numérique.

Tableau 3.2 Températures et tensions mécaniques des essais préliminaires en conditions réelles

Câble	Température (° C)	T_{RO} (kN)	T_{PIAB} (kN)	T_{dynamo} (kN)	T_{vib} (kN)
Hauban 1	-7,8	36,37	37,40	40,03	-
	4,0	34,56	-	-	32,13
	9,1	29,29	34,40	-	-
Hauban 2	-7,8	34,43	-	-	-
	4,0	33,89	-	-	32,23
	9,1	28,72	30,40	-	-
Hauban 3	-7,8	33,28	35,39	37,81	-
	4,0	35,81	-	-	34,27
	9,1	28,50	31,40	-	-
Hauban 4	-7,8	35,65	40,00	52,49	-
	4,0	36,21	-	-	36,12
	9,1	32,26	33,00	-	-
Câble de l'IREQ	19,00	33,50	-	38,00	-

Les résultats de la méthode du retour d'onde et du PIAB montrent une disparité relativement

importante.

3.3 Conception d'un modèle numérique de câble

3.3.1 Modèle statique

Dans cette section, un modèle numérique statique pouvant représenter une vaste gamme de câbles en acier est conçu. L'objectif est d'obtenir un modèle fonctionnant aussi bien pour un câble horizontal court que pour un câble incliné long. Par la suite, le modèle pourra être appliqué au cas particulier des haubans des lignes de transmission d'Hydro-Québec. Les seules charges appliquées sont le poids propre et la température. Le modèle est construit avec le logiciel de calcul par éléments finis ADINA. Il se divise en deux parties : le câble en acier et l'ancrage.

Câble en acier

Le modèle éléments finis du câble en acier est constitué de 400 éléments de poutre tridimensionnels. Tous les DDL de translation (dans le plan du câble et hors-plan) sont autorisés et tous les DDL de rotation sont relâchés, ce qui revient à créer une rotule entre chaque élément. L'extrémité supérieure du câble est fixée et l'extrémité inférieure est modélisée par l'ancrage décrit ci-après.

La tension mécanique dans le câble à 1 m de l'ancrage est donnée en entrée du modèle. Cette tension est appelée T_{cible} . L'intérêt est d'essayer de la recalculer en appliquant la méthode de vibration au modèle numérique. Cependant, un problème s'impose : pour obtenir T_{cible} dans le modèle, il faut imposer une déformation initiale ϵ_0 . Le seul moyen d'obtenir la bonne valeur de ϵ_0 est par essais et erreurs. Cependant, effectuer les itérations sur le modèle éléments finis prend du temps et empêche l'automatisation des calculs, ce qui pose problème pour l'étude de sensibilité. Une solution a été trouvée : effectuer les itérations sur un profil de câble théorique afin de récupérer rapidement la valeur de ϵ_0 à donner en entrée du modèle ADINA. L'équation de la chaînette est choisie. L'algorithme 1 est implémenté à l'aide de Matlab.

Les paramètres d'entrée du modèle statique de câble sont les suivants : section, module élastique, masse linéique, coefficient de dilatation thermique, longueur, inclinaison, température extérieure et tension cible.

Algorithme 1 : Calcul du profil statique par itérations sur l'équation de la chaînette

```

1: Entrées :  $L_{\text{tot}}, \alpha, m, E, A, \alpha_{\text{thermique}}, \Delta T, T_{\text{cible}}$ 
2: Initialiser :  $H_0 \leftarrow T_{\text{cible}}, T_{1\text{m}} \leftarrow 0, dH_0 \leftarrow 0,2 \times H_0$ 
3: Tant que  $\frac{T_{1\text{m}} - T_{\text{cible}}}{T_{\text{cible}}} > 10^{-5}$ 
4:   Si  $T_{1\text{m}} - T_{\text{cible}}$  change de signe
5:      $dH_0 \leftarrow dH_0/2$ 
6:   Fin si
7:   Si  $T_{1\text{m}} > T_{\text{cible}}$ 
8:      $H_0 \leftarrow H_0 - dH_0$ 
9:   Sinon
10:     $H_0 \leftarrow H_0 + dH_0$ 
11:  Fin si
12:  Calculer les paramètres du profil  $\beta, \phi$  et  $f$ 
13:  Calculer les coordonnées du noeud à 1 m de l'ancrage  $y_{1\text{m}}$  et  $z_{1\text{m}}$ 
14:  Calculer la tension dans le câble  $T_{1\text{m}}$ 
15: Fin tant que
16: Calculer les réactions aux appuis  $V_0, T_0, V_1$  et  $T_1$ 
17: Calculer la longueur initiale du câble  $S_0$ 
18: Calculer la déformation initiale  $\epsilon_0$ 
19: Sorties :  $y_{1\text{m}}, z_{1\text{m}}$  and  $\epsilon_0$ 

```

Ancrage

La figure 3.5 montre l'ancrage au sol typique des haubans des lignes de transmission d'Hydro-Québec. Il est constitué de deux pièces en acier de longueur équivalente : un *arceau* et un *œillet*. L'arceau est lié à l'extrémité inférieure du câble et l'œillet est ancré dans le sol. Dans le but de modéliser l'ancrage, les sections équivalentes des deux pièces sont calculées et les rigidités axiales équivalentes sont induites. Les résultats sont disponibles dans le tableau 3.3. Dans le modèle éléments finis, chaque pièce est modélisée par un élément treillis ayant la rigidité calculée. Tous les DDL sont bloqués au niveau du point reliant l'ancrage au sol.

Tableau 3.3 Rigidités axiales équivalentes des pièces de l'ancrage

Pièce	Module élastique (GPa)	Section équivalente (m ²)	Rigidité axiale équivalente (kN)
Arceau	210	$1,58 \times 10^{-3}$	$3,31 \times 10^5$
œillet	210	$9,58 \times 10^{-4}$	$2,01 \times 10^5$

Les paramètres d'entrée du modèle d'ancrage sont les suivants : module élastique, section équivalente et longueur de l'arceau, section équivalente et longueur de l'œillet.

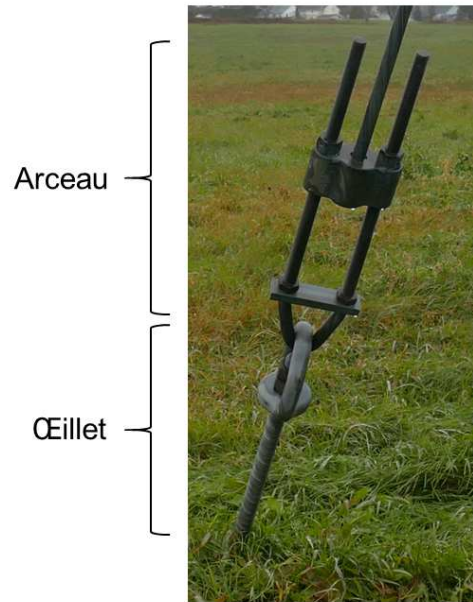


Figure 3.5 Ancrage au sol d'un hauban d'Hydro-Québec (Photographie Najib Bouaanani)

3.3.2 Modèle dynamique

Le modèle dynamique permet de reproduire la méthode du retour d'onde et la méthode de vibration.

Le modèle statique est pris comme état initial du modèle dynamique. Une impulsion est appliquée à l'aide d'un élément d'alignement. Ceci permet de reproduire le tiré-lâché du câble par un utilisateur, ce qui correspond au type d'impulsion pour la méthode du retour d'onde et pour la méthode de vibration. L'élément d'alignement est un type d'élément fini qui permet de rapprocher deux points du modèle. Son fonctionnement est illustré à la figure 3.6. Il est créé après application des charges statiques entre le point du câble à déplacer et un point fixe virtuel cible. Petit à petit, il rapproche le point du câble du point cible. Lorsque les deux se superposent, l'élément d'alignement est tué. Ceci induit une onde qui se propage dans le câble comme attendu. Il est possible d'enregistrer l'accélération en un point du câble afin de modéliser la présence d'un téléphone intelligent. Le signal d'acquisition peut ensuite être post-traité en utilisant différentes méthodes d'analyse modale et différentes formules pratiques reliant la tension aux fréquences naturelles. Par ailleurs, il est également possible d'estimer précisément le temps de retour d'onde afin de le comparer au temps chronométré dans la réalité.

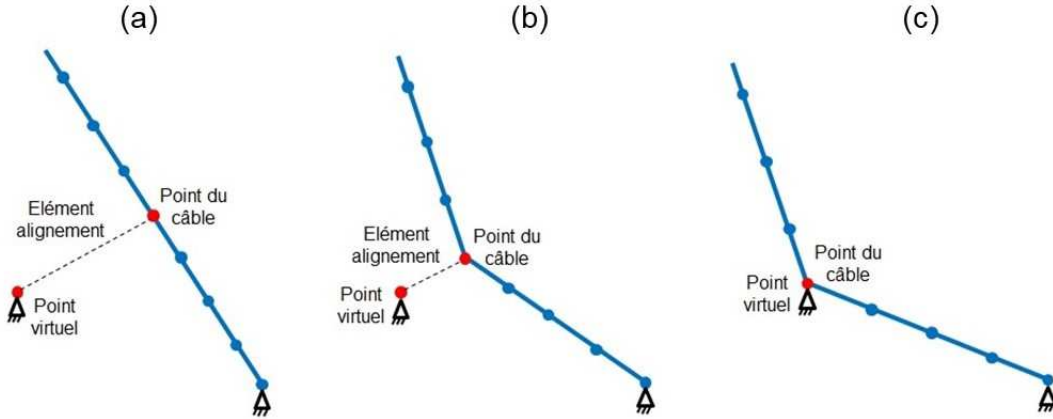


Figure 3.6 Principe de l'élément d'alignement : (a) état initial; (b) état intermédiaire; (c) état final

L'amortissement choisi pour le modèle dynamique est un amortissement de Rayleigh. À titre de rappel, pour un système défini par ses matrices de masse \mathbf{M} , d'amortissement \mathbf{C} et de rigidité \mathbf{K} , l'amortissement de Rayleigh impose une matrice d'amortissement proportionnelle :

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (3.1)$$

Ce sont les coefficients α et β qui sont donnés au modèle ADINA. Ils sont liés au coefficient d'amortissement ξ par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = 2 \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{bmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -\frac{1}{\omega_j} & \frac{1}{\omega_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \xi \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ω_i et ω_j sont deux pulsations naturelles du système. Le développement pour arriver à cette équation est expliqué par Paultre [13].

En plus de l'amortissement et des paramètres du modèle statique, il faut ajouter en entrée du modèle dynamique le temps d'acquisition, le pas de temps et la direction et l'amplitude du déplacement initial.

La figure 3.7 illustre la propagation de l'onde dans le modèle numérique. Le schéma du câble est dilaté selon la direction normale afin d'observer les vibrations. Les deux graphes correspondent au déplacement et à l'accélération en temps réel au point rouge situé à un mètre de l'ancrage.

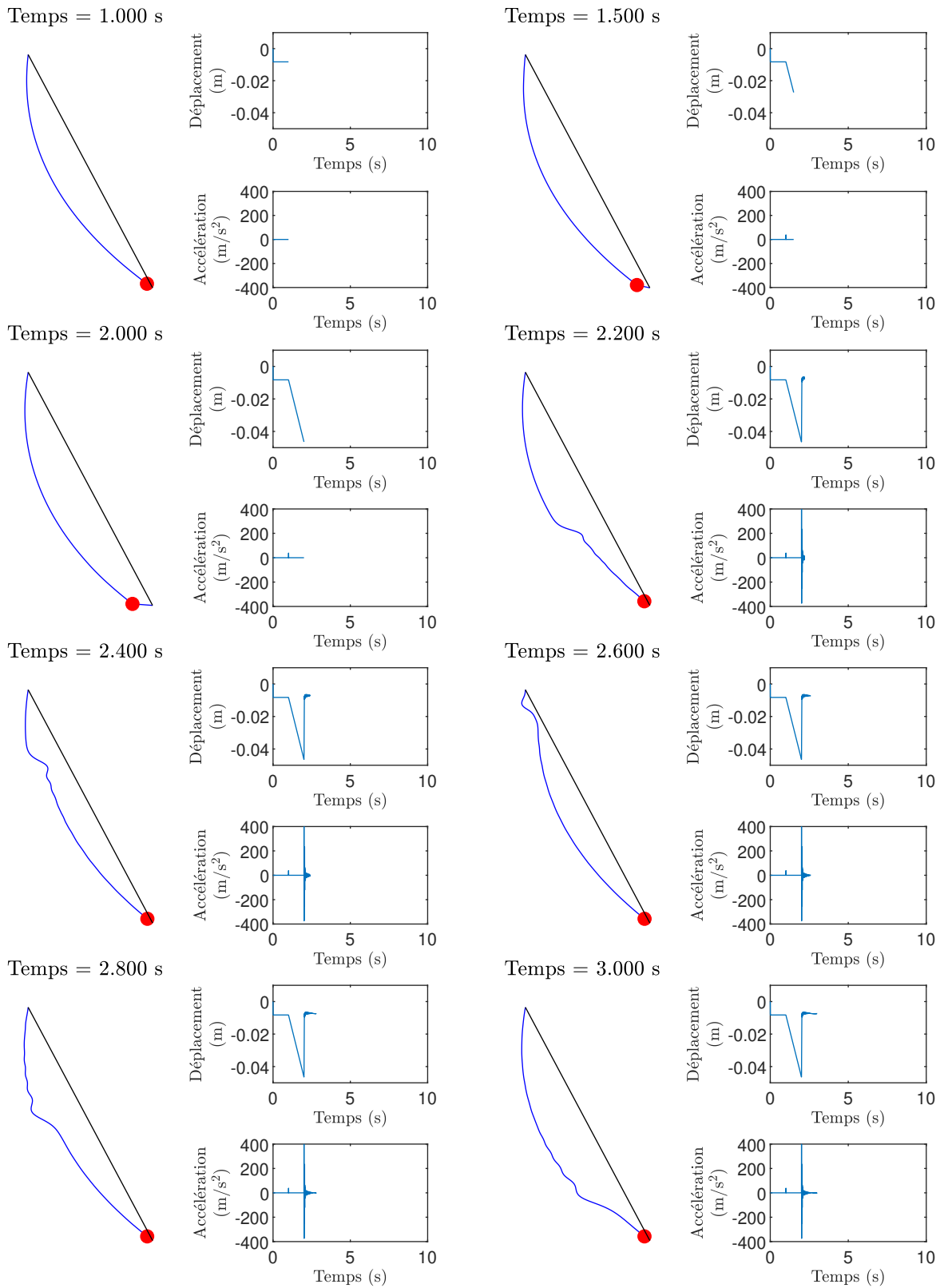


Figure 3.7 Schémas et graphes de la propagation de l'onde dans le modèle numérique

3.3.3 Validation du modèle

Afin de valider le modèle numérique décrit précédemment, plusieurs tests sont effectués.

Tout d'abord, le modèle statique est validé grâce à un profil théorique donné dans [35]. Cette formulation analytique correspond aux équations ci-dessous où \hat{x} est l'abscisse, \hat{z} est l'ordonnée, \hat{H} est la tension horizontale et \hat{V}_A est la composante verticale de la tension à l'extrémité supérieure du câble.

$$\hat{x}(\tilde{s}) = \frac{\hat{H}\tilde{s}}{EA} + \frac{\hat{H}(1 + \alpha\Delta\hat{T})}{\tilde{m}g} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{\hat{V}_A}{\hat{H}} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{\hat{V}_A - \tilde{m}g\tilde{s}}{\hat{H}} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$\hat{z}(\tilde{s}) = \frac{\tilde{m}g\tilde{s}}{EA} \left(\frac{\hat{V}_A}{\tilde{m}g} - \frac{\tilde{s}}{2} \right) + \frac{\hat{H}(1 + \alpha\Delta\hat{T})}{\tilde{m}g} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\hat{V}_A}{\hat{H}} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{\hat{V}_A - \tilde{m}g\tilde{s}}{\hat{H}} \right)^2} \right] \quad (3.4)$$

Dans le cas d'un câble typique d'Hydro-Québec, la flèche $f = \frac{d_v}{L}$ donnée par le modèle statique et celle obtenue avec la formulation analytique sont comparées pour différentes rigidités axiales. Les résultats sont affichés à la figure 3.8a. Les courbes se superposent parfaitement. De plus, afin de vérifier que les profils des câbles sont identiques (et pas seulement les flèches), ceux-ci sont tracés pour une rigidité axiale égale à 100 kN. Les courbes se superposent une nouvelle fois (voir figure 3.8b).

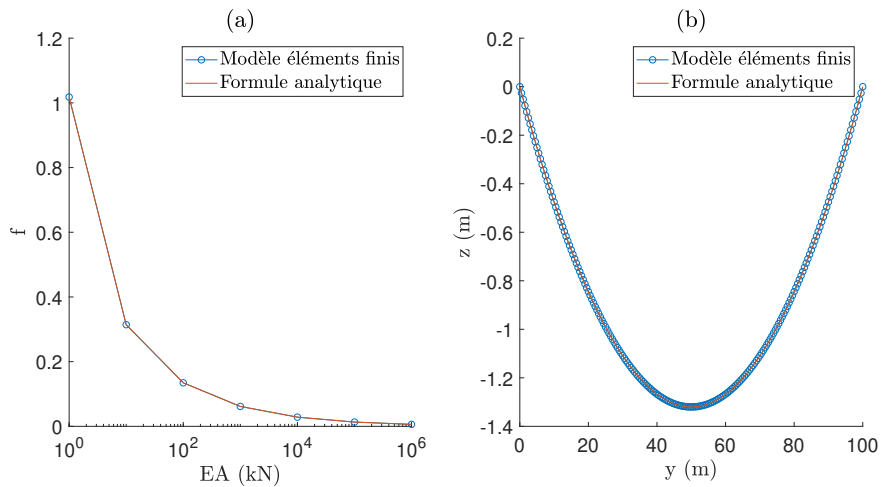


Figure 3.8 Graphes permettant de valider le modèle statique : (a) Évolution de la flèche en fonction de la rigidité axiale; (b) Comparaison des profils pour $EA = 100$ kN

Concernant le modèle dynamique, le nombre d'éléments de poutre et le pas de temps choisis

doivent être validés. Pour rappel, les valeurs sont respectivement de 400 éléments et 5 ms. La manière de procéder est la même dans les deux cas. Pour le hauban 1 décrit à la section 3.2.2, le nombre d'éléments varie entre 50 et 800 et le pas de temps varie entre 1 ms et 100 ms. Pour chaque itération, la tension est calculée avec la méthode de vibration simple (sélection des pics et formule de la corde vibrante). Les résultats sont disponibles respectivement aux figures 3.9a et 3.9b. Dans les deux cas, les valeurs choisies sont dans une zone où la tension a convergé.

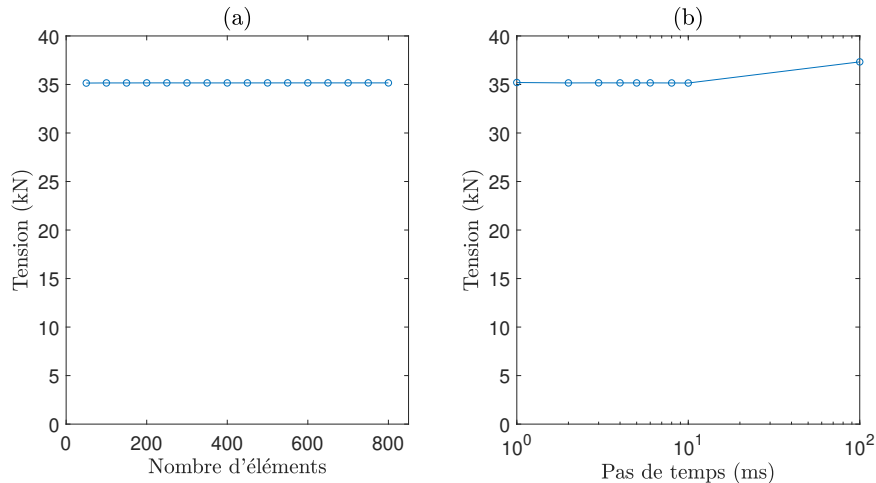


Figure 3.9 Graphes permettant de valider le modèle dynamique : (a) Évolution de la tension en fonction du nombre d'éléments ; (b) Évolution de la tension en fonction du pas de temps

Par ailleurs, il faut noter que choisir 400 éléments et 5 ms à la place de 800 éléments et 1 ms permet de réduire significativement le temps de calcul. Enfin, soulignons que le pas de temps choisi correspond à une fréquence d'acquisition de 200 Hz, ce qui est la fréquence attendue pour l'accéléromètre du téléphone intelligent.

3.4 Implémentation de trois méthodes d'analyse modale

Une fois le modèle éléments finis développé, il reste à choisir les algorithmes de post-traitement à appliquer à l'accélération enregistrée numériquement. Parmi les méthodes d'analyse modale applicables aux haubans des lignes de transmission, les méthodes de sélection des pics (abrégé par la suite PP), d'identification stochastique par sous-espaces fondée sur les covariances (abrégé par la suite SSI-COV) et de décomposition dans le domaine des fréquences (abrégé par la suite FDD) sont sélectionnées. Dans cette section, les algorithmes sont détaillés pour chaque méthode. Ceux-ci sont implémentés avec Matlab.

3.4.1 Méthode de sélection des pics

La méthode PP est la plus simple et la plus rapide. Son principe est le suivant : il s'agit de se placer dans le domaine des fréquences, de sélectionner les pics du spectre de Fourier et d'en déduire la fréquence fondamentale. Pour cela, plusieurs étapes sont nécessaires.

Tout d'abord, le signal d'accélération est transformé dans le domaine des fréquences grâce à une FFT et la densité spectrale de puissance résultante est tracée entre 0 Hz et une certaine valeur f_{\max} . Ensuite, tous les maxima locaux du graphe sont sélectionnés. En raison du bruit du signal, il y a de nombreux maxima. Afin de garder seulement ceux correspondant réellement à une fréquence naturelle, deux critères sont appliqués : un critère d'amplitude et un critère de fréquence. Ils permettent respectivement d'isoler les groupes de pics de grande amplitude et de conserver seulement le pic dominant de chaque groupe. Avec le critère d'amplitude, tous les pics qui ont une amplitude inférieure à $\mu + c \times \sigma$ sont éliminés. Ici, μ et σ sont respectivement la moyenne et l'écart-type de la densité spectrale de puissance et c est une constante. Avec le critère de fréquence, tous les pics qui sont situés à une distance inférieure à f_{\min} d'un pic d'amplitude supérieure sont supprimés. Les pics restant correspondent à une fréquence naturelle f_n . Les étapes sont résumées à la figure 3.10.

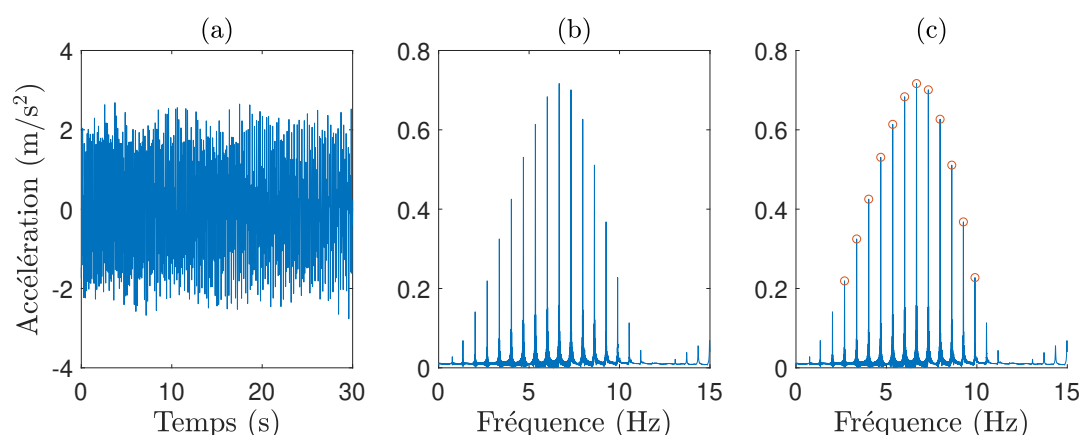


Figure 3.10 Étapes de la méthode PP : (a) Signal d'accélération ; (b) Spectre de Fourier ; (c) Sélection des pics

Lorsque la fréquence fondamentale ne fait pas partie des pics sélectionnés, il faut l'estimer à l'aide d'une méthode de régression. Dans le cas de la théorie de la corde vibrante, les

fréquences naturelles f_n sont liées aux numéros de mode n selon l'équation suivante :

$$f_n = b_1 n \quad (3.5)$$

Cependant, il est recommandé d'ajouter un terme cubique pour un câble incliné.

$$f_n = b_1 n + b_2 n^3 \quad (3.6)$$

Les coefficients de régression b_1 et b_2 sont calculés à partir des couples (f_n, n) grâce à l'équation suivante tirée du livre de Goulet [45] :

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} f_{n_1} \\ f_{n_2} \\ \vdots \\ f_{n_N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} n_1 & n_1^3 \\ n_2 & n_2^3 \\ \vdots & \vdots \\ n_N & n_N^3 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (3.8)$$

Enfin, la fréquence fondamentale f_0 est donnée par $f_0 = b_1 + b_2$.

Par ailleurs, une précision très importante sur la tension estimée est requise. La formule de la corde vibrante appliquée à l'écart relatif en tension permet d'obtenir :

$$\left| \frac{T - T_{\text{cible}}}{T_{\text{cible}}} \right| = \left| \frac{4mL^2 f_0^2 - 4mL^2 f_{0,\text{cible}}^2}{4mL^2 f_{0,\text{cible}}^2} \right| \quad (3.9)$$

$$= \left| \frac{f_0^2 - f_{0,\text{cible}}^2}{f_{0,\text{cible}}^2} \right| \quad (3.10)$$

$$= \left| \left(\frac{f_0 - f_{0,\text{cible}}}{f_{0,\text{cible}}} \right) \left(\frac{f_0 + f_{0,\text{cible}}}{f_{0,\text{cible}}} \right) \right| \quad (3.11)$$

$$\approx \left| \left(\frac{f_0 - f_{0,\text{cible}}}{f_{0,\text{cible}}} \right) \times 2 \right| \quad (3.12)$$

Pour une erreur maximale en tension de 0,1 % et une fréquence cible $f_{0,\text{cible}}$ de l'ordre du hertz, la précision sur la fréquence fondamentale est de :

$$|f_0 - f_{0,\text{cible}}| < \frac{0,1\% \times 1 \text{ Hz}}{2} = 0,0005 \text{ Hz} \quad (3.13)$$

La fréquence fondamentale étant déduite des fréquences naturelles par régression, une précision de 0,001 Hz sur les fréquences naturelles est suffisante. Or, la précision du spectre de Fourier est donnée par la formule $\frac{F_s}{n_p}$ avec F_s la fréquence d'acquisition et n_p le nombre de points dans le signal d'accélération (n_p doit être une puissance de 2). Pour obtenir $\frac{F_s}{n_p} < 0,001$ Hz avec une fréquence d'acquisition égale à 200 Hz, il faut $n_p = 2^{18}$. Par conséquent, le signal d'accélération enregistré avec le modèle numérique doit être complété avec des zéros afin que sa longueur totale soit égale à 2^{18} .

En résumé, l'algorithme 2 est implémenté dans Matlab. Les valeurs choisies pour les constantes sont les suivantes : $n_p = 2^{18}$, $f_{\max} = 20$ Hz, $c = 3$ et $f_{\min} = 0,5$ Hz.

Algorithme 2 : Méthode de sélection des pics

- 1: **Entrées** : $y, n_p, f_{\max}, c, f_{\min}$
 - 2: Ajouter des zéros au signal y jusqu'à obtenir un nombre de points n_p
 - 3: Appliquer l'algorithme de FFT à y
 - 4: Tracer le spectre de puissance entre 0 Hz et f_{\max}
 - 5: Sélectionner tous les pics du spectre de puissance
 - 6: Supprimer les pics ne vérifiant pas le critère d'amplitude $A > \mu + c \times \sigma$
 - 7: Supprimer les pics situés à moins de f_{\min} d'un pic d'amplitude supérieure
 - 8: **Pour** les pics restants
 - 9: Enregistrer la fréquence du pic f_n
 - 10: Calculer le numéro du mode n associé à f_n
 - 11: **Fin pour**
 - 12: **Si** $\neg(\exists n = 1)$
 - 13: Calculer les coefficients de régression b_1 et b_2
 - 14: Extrapoler la fréquence fondamentale f_0
 - 15: **Fin si**
 - 16: **Sortie** : f_0
-

3.4.2 Méthode d'identification stochastique par sous-espaces fondée sur les covariances

La méthode SSI-COV est une méthode du type sortie seulement dans le domaine temporel. Son avantage par rapport à la méthode PP est qu'elle est plus précise et qu'elle peut prendre en compte plusieurs capteurs simultanément. Cependant, elle nécessite un temps de calcul plus grand et elle est plus difficile à calibrer. En particulier, les choix de l'ordre du modèle et du critère de stabilisation peuvent s'avérer difficiles.

Principe des méthodes d'identification stochastique par sous-espaces

Les deux méthodes de SSI (SSI-COV et SSI-DATA) reposent sur le même principe. Pour un système quelconque, l'équation de la dynamique s'écrit :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (3.14)$$

avec \mathbf{M} la matrice de masse, \mathbf{C} la matrice d'amortissement, \mathbf{K} la matrice de rigidité, \mathbf{B} la matrice des excitations, \mathbf{u} le vecteur des intrants et \mathbf{q} le vecteur des déplacements. La taille de \mathbf{q} correspond au nombre de DDL du système. En posant $\mathbf{x}(t) = [\mathbf{q}(t) \quad \dot{\mathbf{q}}(t)]^T$, l'équation de la dynamique devient :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_c\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_c\mathbf{u}(t) \quad (3.15)$$

avec $\mathbf{x}(t)$ le vecteur d'état, $\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}$ la matrice d'état et $\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{b} \end{bmatrix}$ la matrice d'expansion de l'excitation. Cette équation est appelée équation d'état.

\mathbf{y} est le vecteur des observations. Sa taille correspond au nombre de capteurs n_c , c'est-à-dire le nombre d'accéléromètres fixés sur le câble. Pour un téléphone intelligent, n_c vaut 3 en général. Les observations sont liées au vecteur d'état par l'équation d'observation :

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_c\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_c\mathbf{u}(t) \quad (3.16)$$

avec \mathbf{C}_c la matrice de sortie et \mathbf{D}_c la matrice de l'excitation extérieure.

Les relations précédentes sont dans le domaine temporel continu. Comme l'acquisition d'un signal se fait point par point, il faut les discrétiser. En posant $\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(t_k)$ et $\mathbf{y}(k) = \mathbf{y}(t_k)$, les équations d'état et d'observation deviennent respectivement :

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (3.17)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_d\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}_d\mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (3.18)$$

où \mathbf{A}_d , \mathbf{B}_d , \mathbf{C}_d et \mathbf{D}_d sont les matrices définies pour un temps discret, \mathbf{w} est l'incertitude du procédé et \mathbf{v} est l'incertitude de l'observation.

Pour des excitations libres ou aléatoires non corrélées, le modèle espace-état précédemment

défini se simplifie en :

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (3.19)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (3.20)$$

Enfin, il est montré que les valeurs propres μ_k de \mathbf{A}_d et les fréquences naturelles du système f_k sont reliées par la relation :

$$f_k = \frac{|F_s \ln(\mu_k)|}{2\pi} \quad (3.21)$$

Ainsi, les méthodes SSI reposent sur le calcul et la décomposition en valeurs propres de la matrice d'état discrète. Les étapes communes aux méthodes SSI sont résumées à la figure 3.11.

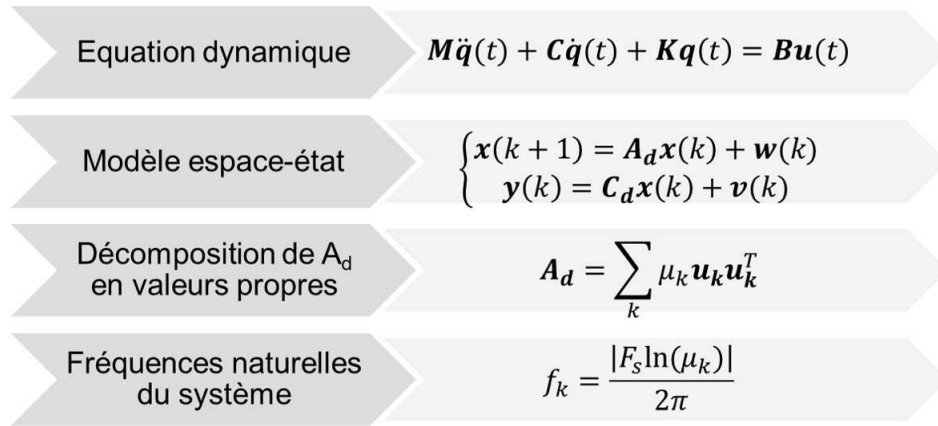


Figure 3.11 Étapes communes aux méthodes SSI

Calcul de la matrice d'état discrète

Dans le cas de la méthode SSI-COV, l'évaluation de la matrice d'état discrète \mathbf{A}_d repose sur le calcul des covariances des observations $\mathbf{\Lambda}_j = \mathbb{E} [\mathbf{y}(k+j)\mathbf{y}(k)^T]$. Pour une valeur donnée de i , la matrice de Hankel \mathbf{H}_i est construite en utilisant $\mathbf{\Lambda}_1, \mathbf{\Lambda}_2, \dots, \mathbf{\Lambda}_{2i-1}$. Ensuite, \mathbf{H}_i est décomposée en valeurs singulières afin d'obtenir la matrice d'observabilité \mathbf{O}_i . Enfin, les matrices \mathbf{O}_{i-1} et \mathbf{O}_i^\dagger sont déduites de \mathbf{O}_i et sont utilisées pour calculer \mathbf{A}_d . Les étapes sont résumées par les équations suivantes où n_d est la longueur du signal d'accélération, $\mathbf{U}_i, \mathbf{S}_i$ et \mathbf{V}_i sont les matrices de la décomposition en valeurs singulières de \mathbf{H}_i et l'exposant $+$ fait référence au pseudo-inverse de Moore-Penrose.

$$\Lambda_j = \frac{1}{n_d - 1} \sum_{k=0}^{n_d-j-1} \mathbf{y}(k+j)\mathbf{y}(k)^T \quad (3.22)$$

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & \Lambda_2 & \dots & \Lambda_i \\ \Lambda_2 & \Lambda_3 & \dots & \Lambda_{i+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda_i & \Lambda_{i+1} & \dots & \Lambda_{2i-1} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i \mathbf{V}_i^T \quad (3.24)$$

$$\mathbf{O}_i = [\mathbf{C}_d \quad \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d \quad \dots \quad \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^{i-1}]^T = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i^{1/2} \quad (3.25)$$

$$\mathbf{O}_{i-1} = \mathbf{O}_i[1 : n_a(i-1)] \quad (3.26)$$

$$\mathbf{O}_i^\uparrow = \mathbf{O}_i[n_a + 1 : n_a i] \quad (3.27)$$

$$\mathbf{A}_d = \mathbf{O}_{i-1}^+ \mathbf{O}_i^\uparrow \quad (3.28)$$

Calcul de la fréquence fondamentale

Le principe de la méthode est de faire varier le paramètre i entre 1 et une valeur m appelée ordre du modèle. Pour chaque valeur de i , une matrice d'état discrète est évaluée et décomposée afin de calculer plusieurs fréquences naturelles. Celles-ci sont ajoutées à un graphe appelé diagramme de stabilisation. Ce diagramme affiche les fréquences en abscisse et le paramètre i en ordonnée. Un exemple est donné à la figure 3.12a. Afin de supprimer d'éventuels modes fictifs, un critère de stabilisation est appliqué : la fréquence f_k du mode $i+1$ est conservée si et seulement si il existe une fréquence f_l du mode i telle que $\left| \frac{f_k - f_l}{f_k} \right| < \epsilon_f$. Ensuite, les fréquences restantes sont groupées dans des agrégats grâce à un algorithme de classification hiérarchique.

L'algorithme de classification hiérarchique emploie une approche de type bottom-up. Initialement, chaque fréquence forme son propre agrégat. Les agrégats les plus proches sont ensuite fusionnés deux à deux jusqu'à ce qu'il n'en reste qu'un. Les différentes étapes peuvent être observées à l'aide d'un dendogramme (voir figure 3.12b). Il s'agit d'un arbre dont les feuilles sont les points de départ et les branches sont les agrégats. La hauteur des U est proportionnelle à la distance entre les deux agrégats fusionnés. Pour obtenir la répartition finale, il suffit de choisir une distance d_{\max} à partir de laquelle deux agrégats ne seront plus fusionnés.

Enfin, un critère de taille est appliqué : les agrégats de cardinal trop faible sont éliminés. Les fréquences naturelles correspondent alors aux centroïdes des agrégats restants. Les histo-

grammes des fréquences avant et après application du critère de taille sont donnés aux figures 3.12c et 3.12d.

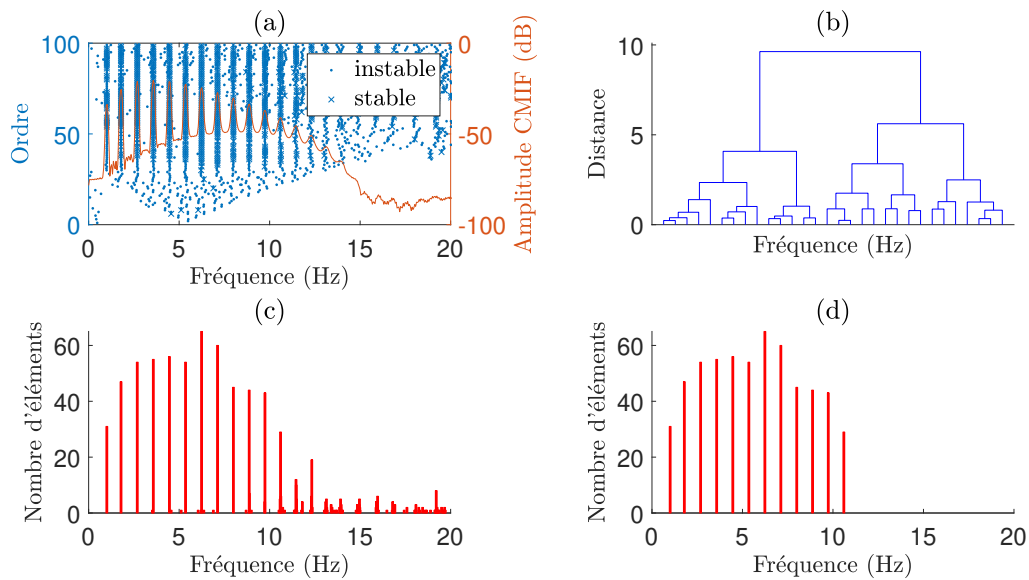


Figure 3.12 Étapes de la méthode SSI-COV : (a) Diagramme de stabilisation ; (b) Dendrogramme ; (c) Histogramme avant application du critère de taille ; (d) Histogramme après application du critère de taille

De même que pour la méthode PP, la fréquence fondamentale f_0 est estimée par régression linéaire lorsqu'elle ne fait pas partie des fréquences naturelles déterminées.

En résumé, l'algorithme 3 est implémenté dans Matlab. Les valeurs choisies pour les constantes sont les suivantes : $m = 100$, $\epsilon_f = 0,1 \%$, $d_{\max} = 0,01$ Hz.

Algorithme 3 : Méthode d'identification stochastique par sous-espaces fondée sur les covariances

- 1: **Entrées** : $y, m, \epsilon_f, d_{\max}$
 - 2: **Pour** i allant de 1 à m
 - 3: **Pour** j allant de 1 à $2i - 1$
 - 4: Calculer la matrice de covariance $\mathbf{\Lambda}_j$
 - 5: **Fin pour**
 - 6: Calculer la matrice de Hankel \mathbf{H}_i
 - 7: Faire la décomposition en valeurs singulières de \mathbf{H}_i
 - 8: Calculer la matrice d'observabilité \mathbf{O}_i
 - 9: Calculer \mathbf{O}_{i-1} et \mathbf{O}_i^\dagger
 - 10: Calculer la matrice d'état discrète \mathbf{A}_d
 - 11: Trouver les valeurs propres μ_k de \mathbf{A}_d
 - 12: Calculer les fréquences naturelles f_k
 - 13: **Fin pour**
 - 14: Construire le diagramme de stabilisation des fréquences
 - 15: Appliquer le critère de stabilisation ϵ_f
 - 16: Appliquer l'algorithme de classification hiérarchique avec le critère de distance d_{\max}
 - 17: Retirer les agrégats dont le cardinal est inférieur à $m/10$
 - 18: Calculer les centroïdes des agrégats restants f_n
 - 19: Calculer les numéros de mode n associés aux fréquences naturelles f_n
 - 20: **Si** $\neg(\exists n = 1)$
 - 21: Calculer les coefficients de régression b_1 et b_2
 - 22: Extrapoler la fréquence fondamentale f_0
 - 23: **Fin si**
 - 24: **Sortie** : f_0
-

3.4.3 Méthode de décomposition dans le domaine des fréquences

La méthode FDD est une méthode du type sortie seulement dans le domaine des fréquences. Il s'agit d'une amélioration de la méthode PP. Elle est rapide et simple à utiliser mais reste limitée par la résolution sur les fréquences. Son avantage par rapport à la méthode PP est qu'elle permet de déterminer les amortissements et les modes de vibrations en plus des fréquences naturelles lorsque plusieurs capteurs sont utilisés. Le principe de la méthode est de décomposer la matrice de densité spectrale des sorties $\mathbf{G}_{yy}(j\omega)$ en valeurs singulières afin de se ramener à un système à un degré de liberté.

Tout d'abord, Brincker [16] montre qu'une décomposition modale de $\mathbf{G}_{yy}(j\omega)$ peut être faite :

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{n \in \text{Sub}(\omega)} \frac{d_n \Phi_n \Phi_n^T}{j\omega - \lambda_n} + \frac{d_n \bar{\Phi}_n \bar{\Phi}_n^T}{j\omega - \lambda_n} \quad (3.29)$$

avec $\text{Sub}(\omega)$ l'ensemble des modes contribuant significativement à la fréquence ω , Φ_n la déformée modale et d_n une constante de normalisation.

En réalité, $\mathbf{G}_{yy}(j\omega)$ est évaluée seulement en certaines fréquences discrètes ω_i allant de 0 rad/s à ω_{\max} . Pour chacune de ces fréquences, $\mathbf{G}_{yy}(j\omega_i)$ peut être décomposé en valeurs singulières :

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega_i) = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i \bar{\mathbf{U}}_i^T \quad (3.30)$$

avec \mathbf{U}_i une matrice contenant les vecteurs singuliers et \mathbf{S}_i une matrice diagonale contenant les valeurs singulières. Les courbes des valeurs singulières en fonction de la fréquence sont tracées à la figure 3.13a. Les pics correspondent à des modes propres. Ils sont sélectionnés grâce à un algorithme de sélection des pics identique à celui présenté dans la section 3.4.1. Pour le pic localisé à la fréquence ω_n correspondant au $n^{\text{ième}}$ mode, l'ensemble $\text{Sub}(\omega_n)$ est égal à $\{n\}$. En identifiant les équations (3.29) et (3.30), il est observé que le premier vecteur singulier correspond à la déformée modale Φ_n et la première valeur singulière correspond à la fonction de densité d'un système à un seul degré de liberté $f_{\text{SDOF},n}$ évaluée en ω_n :

$$\Phi_n = \mathbf{U}_n(1) \quad (3.31)$$

$$f_{\text{SDOF},n}(\omega_n) = \mathbf{S}_n(1,1) \quad (3.32)$$

$f_{\text{SDOF},n}$ est ensuite évaluée autour du pic, c'est-à-dire à des fréquences ω_i proches de ω_n (voir figure 3.13b). Tant que le premier vecteur singulier à la fréquence ω_i est proche de la déformée du mode n , la première valeur singulière correspondante est ajoutée à la fonction de densité. Pour savoir si $\mathbf{U}_i(1)$ et Φ_n sont proches, le critère d'assurance modale [46] est utilisé.

La fonction de densité $f_{\text{SDOF},n}$ ainsi définie est utilisée pour obtenir la fréquence naturelle et l'amortissement. Pour ce faire, il suffit de la ramener dans le domaine du temps avec une transformée de Fourier inverse et de déterminer graphiquement la période et le décrement logarithmique. Ces deux dernières étapes sont illustrées par les figures 3.13c et 3.13d.

Comme pour les deux autres méthodes, la fréquence fondamentale f_0 est estimée par régres-

sion linéaire lorsqu'elle ne fait pas partie des fréquences naturelles déterminées.

En résumé, l'algorithme 4 est implémenté dans Matlab. La valeur choisie pour f_{\max} est 15 Hz.

Algorithme 4 : Méthode de décomposition dans le domaine des fréquences

- 1: **Entrée :** y, f_{\max}
 - 2: Calculer la matrice de densité spectrale $G_{yy}(j\omega)$ entre 0 Hz et f_{\max}
 - 3: Déterminer la taille de l'échantillon en fréquence n_{freq}
 - 4: **Pour** i allant de 1 à n_{freq}
 - 5: Décomposer $G_{yy}(j\omega_i)$ en valeurs singulières s_{i1}, s_{i2}, \dots
 - 6: **Fin pour**
 - 7: Tracer les courbes des valeurs singulières entre 0 Hz et f_{\max}
 - 8: Identifier les fréquences ω_n des pics des courbes
 - 9: Identifier le nombre de modes N
 - 10: **Pour** n allant de 1 à N
 - 11: $f_{\text{SDOF},n}(\omega_n) = s_{n1}$
 - 12: **Pour** i proche de n
 - 13: Calculer le critère d'assurance modale $\text{CAM}(n,i)$
 - 14: **Si** $\text{CAM}(n,i)$ est proche de 1
 - 15: $f_{\text{SDOF},n}(\omega_i) = s_{i1}$
 - 16: **Fin si**
 - 17: **Fin pour**
 - 18: **Fin pour**
 - 19: **Pour** n allant de 1 à N
 - 20: Faire une transformée de Fourier inverse de $f_{\text{SDOF},n}$
 - 21: Déterminer graphiquement la période T_n
 - 22: En déduire la fréquence naturelle f_n
 - 23: **Fin pour**
 - 24: Calculer les numéros de mode n associés aux fréquences naturelles f_n
 - 25: **Si** $\neg(\exists n = 1)$
 - 26: Calculer les coefficients de régression b_1 et b_2
 - 27: Extrapoler la fréquence fondamentale f_0
 - 28: **Fin si**
 - 29: **Sortie :** f_0
-

Pour conclure cette section, un résumé des trois méthodes d'analyse modale est proposé à la figure 3.14.

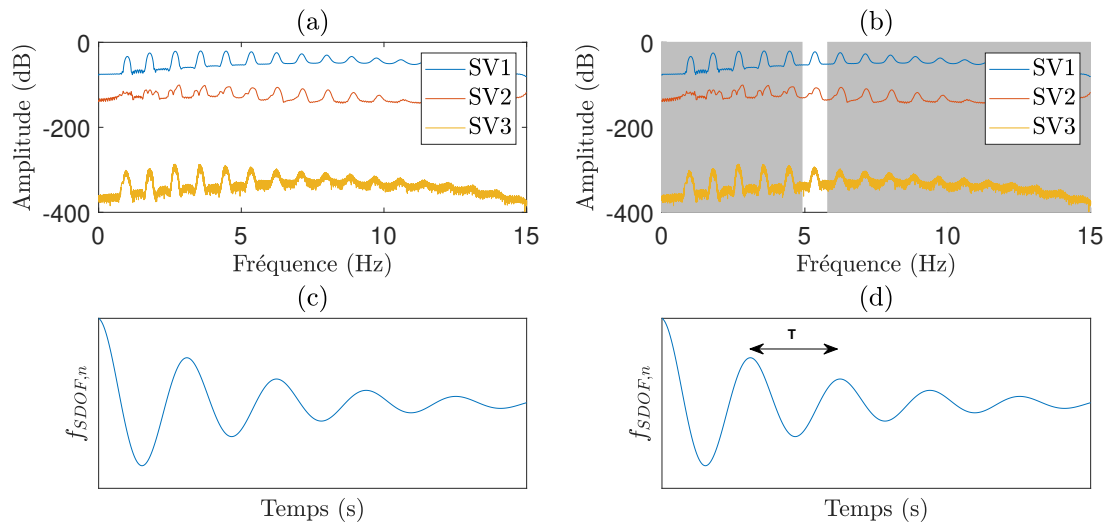


Figure 3.13 Étapes de la méthode FDD : (a) Courbes des valeurs singulières ; (b) Évaluation de $f_{SDOF,n}$ autour d'un pic ; (c) Transformation de $f_{SDOF,n}$ dans le domaine temporel ; (d) Évaluation de la fréquence fondamentale associée

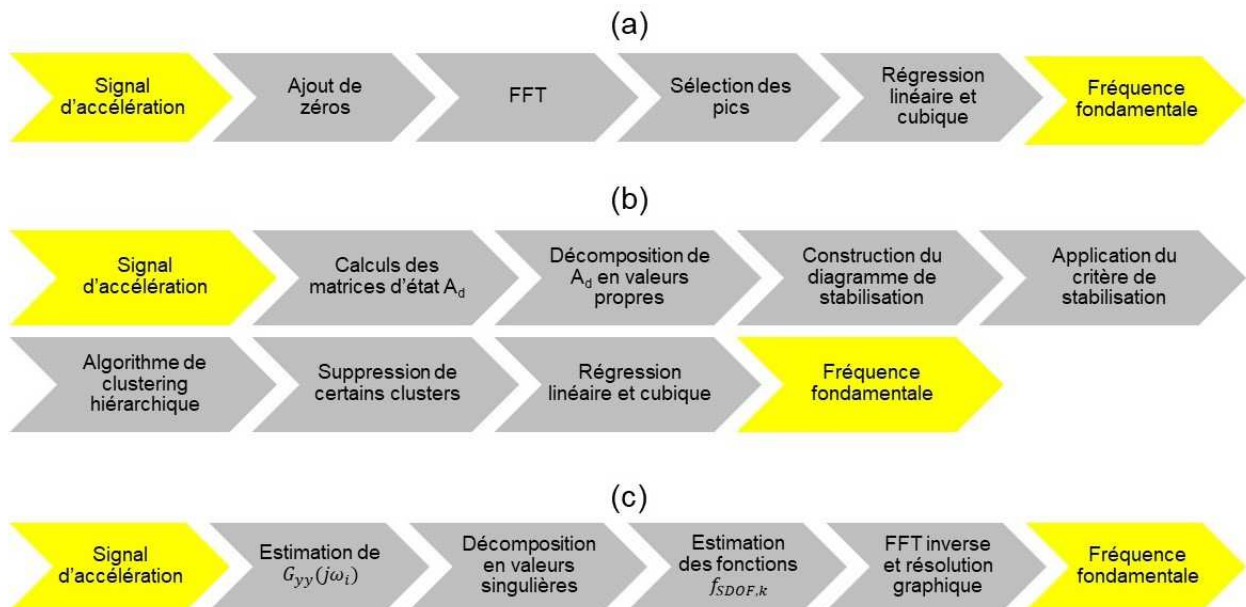


Figure 3.14 Résumé des trois méthodes d'analyse modale : (a) FFT ; (b) SSI-COV ; (c) FDD

3.5 Étude de sensibilité : présentation

Comme indiqué en introduction de ce chapitre, l'étude de sensibilité a deux objectifs : étudier l'influence de certains paramètres et choisir la meilleure méthode d'analyse modale et la meilleure formule reliant les fréquences à la tension dans le cadre des haubans des lignes de transmission. Le principe de cette étude de sensibilité est de reproduire les essais préliminaires en conditions réelles décrits à la section 3.2.2 à l'aide du modèle numérique présenté à la section 3.3 et de faire varier les valeurs de certains paramètres autour des valeurs réelles.

3.5.1 Présentation d'une simulation

Pour cette étude de sensibilité, un grand nombre de simulations est effectué. Commençons par présenter le déroulement d'une simulation.

La première étape est de choisir les paramètres d'entrée statiques et dynamiques du modèle numérique énumérés dans les sections 3.3.1 et 3.3.2. La tension cible est choisie à l'aide des tensions mesurées lors des essais préliminaires (voir tableau 3.2 à la page 33). Ensuite, les analyses statique, modale¹ et dynamique sont lancées. Une fois qu'elles ont abouti, le déplacement et l'accélération du câble en un point issus de l'analyse dynamique sont enregistrés. D'une part, le déplacement est utilisé pour évaluer le temps de retour d'onde t_{RO} et la formule associée est appliquée pour obtenir la tension de retour d'onde T_{RO} . D'autre part, l'accélération est donnée en entrée des trois méthodes d'analyse modale décrites dans la section 3.4 afin d'obtenir les fréquences fondamentales $f_{0,PP}$, $f_{0,SSI-COV}$ et $f_{0,FDD}$. Enfin, la formule de la corde vibrante est appliquée, ce qui donne T_{PP} , $T_{SSI-COV}$ et T_{FDD} .

1. L'analyse modale est faite avec ADINA en prenant le résultat de l'analyse statique comme état initial.

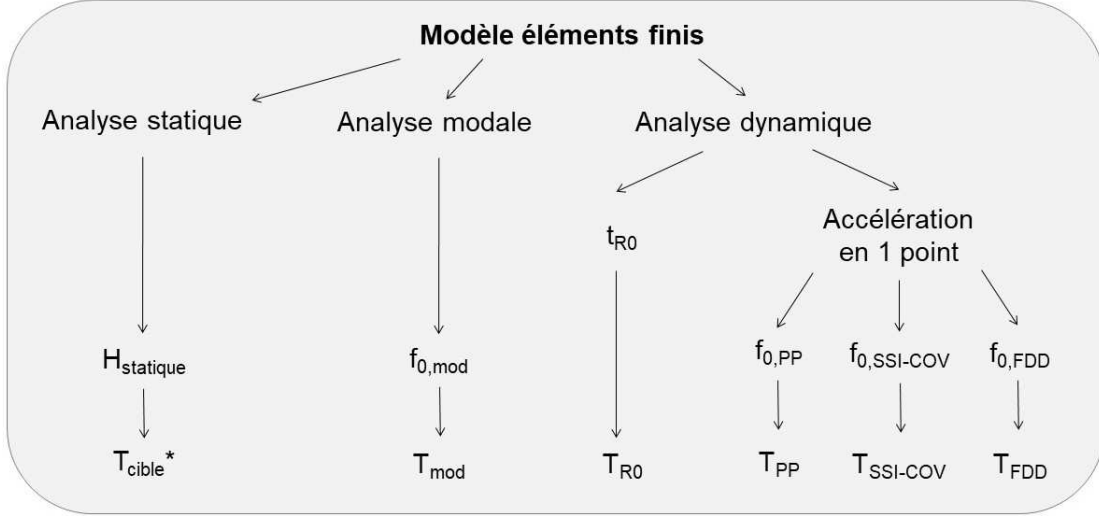


Figure 3.15 Synthèse des sorties d'une simulation

Le déroulement d'une simulation est résumé à la figure 3.15. En sortie d'une simulation, six valeurs différentes de la tension dans le câble sont obtenues :

- H_{statique} : tension horizontale du modèle statique ;
- T_{mod} : tension donnée par l'application de la formule de la corde vibrante sur la fréquence fondamentale $f_{0,\text{mod}}$ tirée de l'analyse modale ;
- T_{RO} : tension obtenue après application de la méthode du retour d'onde ;
- T_{PP} : tension obtenue après application de la méthode PP ;
- $T_{\text{SSI-COV}}$: tension obtenue après application de la méthode SSI-COV ;
- T_{FDD} : tension obtenue après application de la méthode FDD.

Comme expliqué dans la section 3.2.1, les tensions obtenues avec la méthode du retour d'onde et la méthode de vibration sont des constantes globales pour un câble donné dans une configuration donnée. Elles correspondent à la composante de la tension horizontale parallèle à la corde. Ce n'est donc pas avec T_{cible} mais avec $H_{\text{statique}}/\cos \theta$ qu'il faut comparer T_{RO} , T_{PP} , $T_{\text{SSI-COV}}$ et T_{FDD} . Cette valeur est notée T_{cible}^* .

Par ailleurs, l'écart entre T_{cible}^* et T_{PP} (respectivement $T_{\text{SSI-COV}}$, T_{FDD}) peut être décomposé de la façon suivante :

$$T_{\text{cible}}^* - T_{\text{PP}} = (T_{\text{cible}}^* - T_{\text{mod}}) + (T_{\text{mod}} - T_{\text{PP}}) \quad (3.33)$$

L'écart entre T_{cible}^* et T_{mod} indique l'erreur causée par la formule de la corde vibrante et l'écart entre T_{mod} et T_{PP} (respectivement $T_{\text{SSI-COV}}$, T_{FDD}) montre l'erreur faite en utilisant la méthode PP (respectivement SSI-COV, FDD).

3.5.2 Paramètres de l'étude

L'étude de sensibilité est effectuée sur les haubans du pylône en V haubané de Terrebonne et le câble de l'IREQ décrits à la section 3.2.2. Certains paramètres d'entrée sont constants pour toutes les simulations. Parmi les paramètres statiques, les valeurs du module élastique, de la masse linéique, du coefficient de dilatation thermique, de la section du câble, de la section équivalente de l'arceau, de la section équivalente de l'œillet et de l'inclinaison sont égales aux valeurs réelles. Parmi les paramètres dynamiques, le temps d'acquisition, le pas de temps et le déplacement initial du câble sont fixés. Les valeurs des paramètres constants sont indiqués dans le tableau 3.4.

D'autres paramètres dépendent du câble modélisé. Il s'agit de la longueur du câble, de la longueur de l'ancrage, de la température de l'essai et de la tension cible. La tension cible est choisie comme étant la tension mesurée à l'aide du dynamomètre, du PIAB ou de la méthode de vibration simplifiée (dans l'ordre de priorité) lors des essais préliminaires. Les valeurs des paramètres variant pour chaque câble sont indiqués dans le tableau 3.5.

Enfin, les derniers paramètres varient pour chaque simulation. Il s'agit de la direction du déplacement initial du câble \vec{d} , du coefficient d'amortissement ξ et de la méthode d'analyse modale \mathcal{M} . Leurs valeurs sont les suivantes :

$$\begin{aligned}\vec{d} &\in \{\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z, \vec{n}, \vec{v}\} \\ \xi &\in \{0\%, 1\%, 2\%, 3\%\} \\ \mathcal{M} &\in \{\text{PP}, \text{SSI-COV}, \text{FDD}\}\end{aligned}$$

Les différentes valeurs testées pour la direction du déplacement initial du câble \vec{d} sont :

- \vec{e}_x : direction horizontale orthogonale au plan du câble ;
- \vec{e}_y : direction horizontale dans le plan du câble ;
- \vec{e}_z : direction verticale dans le plan du câble ;
- \vec{n} : direction normale au câble dans le plan du câble ;
- \vec{v} : combinaison entre \vec{e}_x et \vec{e}_z .

Tableau 3.4 Paramètres d'entrée constants

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur(s)
Module élastique	E	GPa	200
Masse linéique	m	kg/m	3,429
Coefficient de dilatation thermique	$\alpha_{\text{thermique}}$	K	$1,25 \times 10^{-5}$
Section du câble	$A_{\text{câble}}$	m ²	$5,72 \times 10^{-4}$
Section équivalente de l'arceau	A_{arceau}	m ²	$1,58 \times 10^{-3}$
Section équivalente de l'œillet	$A_{\text{œillet}}$	m ²	$9,58 \times 10^{-4}$
Inclinaison	θ	°	55,967
Temps d'acquisition	t_{acq}	s	60
Pas de temps	dt	s	0,005
Déplacement initial du câble	δ	m	0,01

Tableau 3.5 Paramètres d'entrée variant pour chaque câble

Câble	Longueur du câble (m)	Longueur de l'ancrage (m)	Temperature (°)	Tension (kN)
Hauban 1	55,45	1,10	-7,8	40,03
			4,0	32,13
			9,1	34,40
Hauban 2	52,58	1,35	4,0	32,23
			9,1	30,40
Hauban 3	53,24	1,40	-7,8	37,81
			4,0	34,27
			9,1	31,40
Hauban 4	54,56	1,46	-7,8	52,49
			4,0	36,12
			9,1	33,00
Câble de l'IREQ	17,60	-	19,0	38,00

3.5.3 Automatisation des calculs et du post-traitement

Avec les paramètres de l'étude définis précédemment, 1440 valeurs différentes de la tension mécanique doivent être obtenues. Face au nombre important de simulations requises, il faut automatiser les calculs et le post-traitement. Pour cela, les logiciels Matlab et ADINA sont utilisés.

Pour arriver à nos fins, quatre étapes doivent être réalisées :

1. Générer les calculs avec le script `Main.m` ;
2. Lancer les calculs sous ADINA avec l'exécutable `Run.bat` ;
3. Lancer le post-traitement sous ADINA avec l'exécutable `Process.bat` ;
4. Effectuer le post-traitement avec le script Matlab `Post_traitement.m`.

Lors de la première étape, l'ensemble des paramètres de l'étude est indiqué dans Matlab. Au lancement du script `Main.m`, un dossier nommé *Batch* est créé et différents fichiers y sont insérés : des fichiers textes d'extension IN et PLO pour chaque combinaison de paramètres ainsi que deux fichiers exécutables appelés `Run.bat` et `Process.bat`. Les fichiers d'extension IN et PLO sont lus par ADINA lors des étapes 2 et 3 respectivement. Les exécutables permettent de lancer en série les calculs et les post-traitements sous ADINA. Afin de diminuer le temps de calcul, il est possible de générer plusieurs exécutables (`Run_1.bat`, `Run_2.bat`, ..., `Run_n.bat`) pouvant être lancés en même temps afin d'effectuer les calculs en parallèle. À la fin de la troisième étape, des fichiers textes d'extension TXT contenant l'accélération et le déplacement en un point en fonction du temps sont générés. Ces fichiers sont lus lors de la dernière étape. Celle-ci permet d'appliquer automatiquement la méthode du retour d'onde, les trois méthodes d'analyse modale et la formule de la corde vibrante aux données d'accélération et de déplacement. La figure 3.16 résume les quatre étapes détaillées ci-dessus.

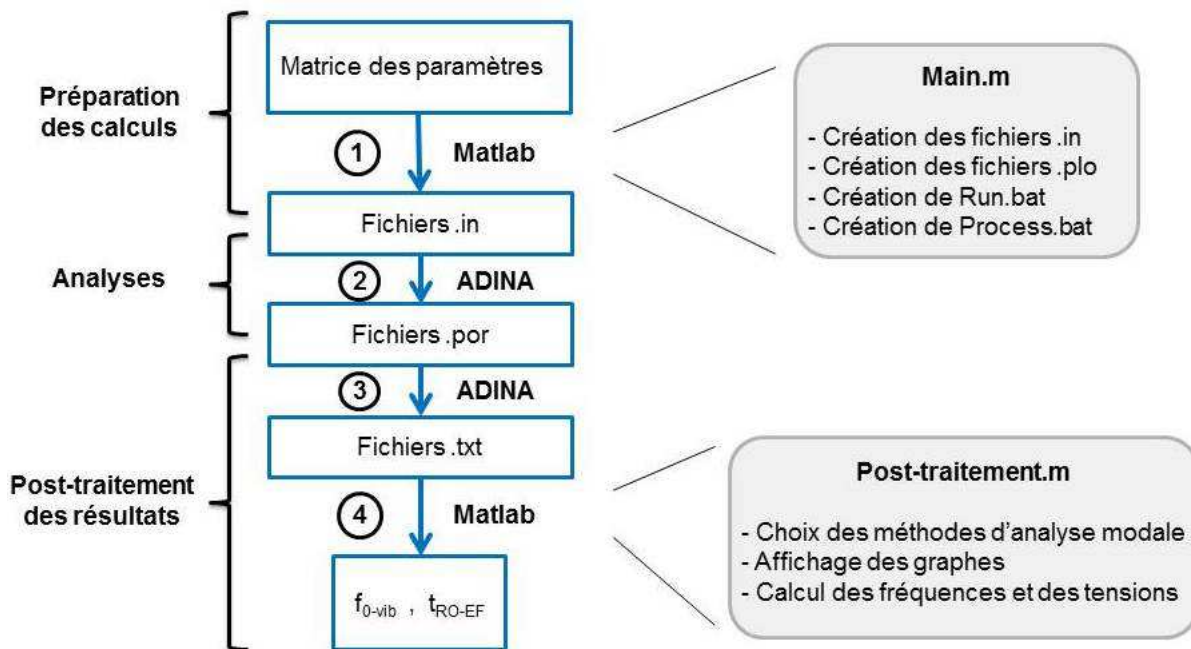


Figure 3.16 Automatisation des calculs et du post-traitement

3.6 Étude de sensibilité : résultats

Dans cette section, les résultats de l'étude de sensibilité précédemment décrite sont exposés. Trois thèmes sont abordés : critique de la méthode du retour d'onde (3.6.1), optimisation de

la méthode de vibration (3.6.2 et 3.6.3) et influence de certains paramètres (3.6.4 et 3.6.5).

3.6.1 Comparaison de la méthode du retour d'onde et de la méthode de vibration

Pour mieux la critiquer, la méthode du retour d'onde est comparée avec la méthode de vibration. Pour cette étude, seuls les résultats obtenus après application de la méthode PP sont retenus. Les deux autres méthodes d'analyse modale seront étudiées dans la section 3.6.3. Par ailleurs, ξ et \vec{d} sont limités respectivement à $\{0\%, 1\%\}$ et $\{\vec{e}_x, \vec{n}\}$. Les autres valeurs de sont exclues pour des raisons expliquées dans les sections 3.6.4 et 3.6.5. Ceci donne 48 valeurs différentes pour T_{PP} et T_{RO} . Les différences relatives entre ces valeurs et T_{cible}^* sont affichées sur les deux histogrammes de la figure 3.17. De plus, le tableau 3.6 contient les valeurs des moyennes et des écarts-types des deux histogrammes. Il est observé que la méthode de vibration est à la fois plus précise (médiane et moyenne plus faibles) et plus fiable (écart-type plus faible). Cependant, il faut noter que la précision et la fiabilité de la méthode de retour d'onde numérique sont bien supérieures à celles du cas réel. Ceci confirme que cette méthode est performante en théorie. La raison pour laquelle elle manque de précision dans la réalité est qu'il est impossible pour un utilisateur de mesurer un temps avec une précision de l'ordre de la milliseconde.

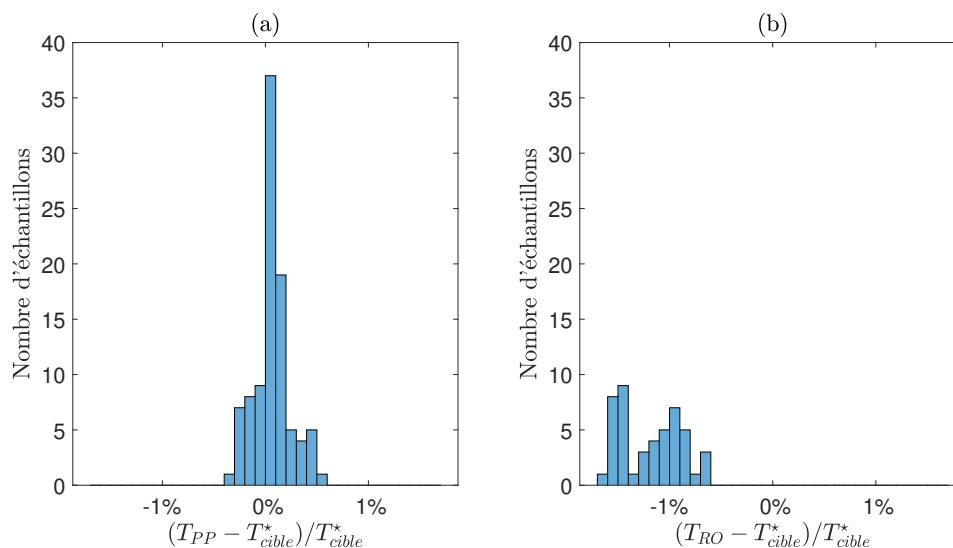


Figure 3.17 Différence relative entre la tension mécanique estimée et T_{cible}^* : (a) Méthode de vibration simple ; (b) Méthode du retour d'onde

Tableau 3.6 Moyennes et écarts-types des histogrammes de la figure 3.17

Histogramme	Médiane	Moyenne	Écart-type
Figure 3.17a	0,05 %	0,07 %	0,18 %
Figure 3.17b	-1,14 %	-1,18 %	0,29 %

3.6.2 Critique de la formule de la corde vibrante

L'étude analytique de la section 3.2.1 a montré que la formule de la corde vibrante peut être utilisée dans le cadre de la méthode du retour d'onde car l'erreur causée par l'estimation du temps de retour d'onde est bien plus importante que l'erreur due à l'utilisation de cette formule. Cependant, ce raisonnement ne s'applique pas à la méthode de vibration. Il faut faire une étude plus approfondie.

La tension estimée avec la méthode de vibration est notée T_{vib} . Ici, T_{vib} vaut T_{PP} , $T_{\text{SSI-COV}}$ ou T_{FDD} . L'erreur faite sur l'estimation de T_{vib} peut être décomposée en la somme de l'erreur causée par la formule de la corde vibrante et l'erreur due à la méthode d'analyse modale. Afin de savoir si l'une des deux erreurs est dominante, celles-ci sont estimées. Pour cela, les valeurs de T_{vib} et T_{mod} sont évaluées pour chaque combinaison de paramètres et deux histogrammes sont tracés (voir figure 3.18). Le premier affiche la différence relative entre T_{cible}^* et T_{mod} et le second montre la différence relative entre T_{mod} et T_{vib} . Le tableau 3.7 contient les valeurs des moyennes et des écarts-types des deux histogrammes. Deux observations peuvent être faites : les erreurs sont centrées en zéro dans les deux cas et la dispersion est beaucoup plus importante dans le cas de la différence relative entre T_{mod} et T_{vib} . C'est donc l'erreur due à la méthode d'analyse modale qui contribue le plus à l'erreur faite sur l'estimation de T_{vib} . Par conséquent, la formule de la corde vibrante peut être conservée pour estimer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission à l'aide de la méthode de vibration.

Tableau 3.7 Moyennes et écarts-types des histogrammes de la figure 3.18

Histogramme	Médiane	Moyenne	Écart-type
Figure 3.18a	0,01 %	-0,02 %	0,07 %
Figure 3.18b	0,04 %	0,04 %	0,21 %

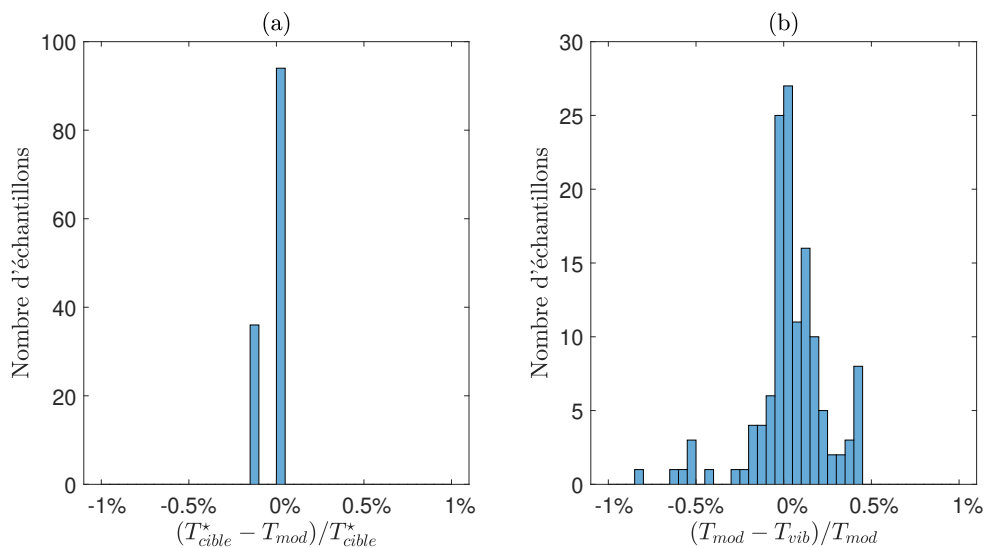


Figure 3.18 Décomposition de l'erreur : (a) Erreur due à la formule de la corde vibrante; (b) Erreur due à la méthode d'analyse modale

3.6.3 Comparaison des trois méthodes d'analyse modale

Maintenant que le choix de la formule permettant de relier les fréquences naturelles à la tension est arrêté, il reste à choisir la méthode d'analyse modale. L'étude précédente montre que ce point est crucial puisque l'erreur principale vient de là.

Comme précédemment, toutes les combinaisons possibles des paramètres d'entrée sont considérées. Les valeurs de T_{PP} , $T_{SSI-COV}$ et T_{FDD} sont évaluées puis comparées à T_{mod} . Les histogrammes des différences relatives sont disponibles aux figures 3.19a, 3.19b et 3.19c respectivement. Leurs médianes, moyennes et écarts-types sont données dans le tableau 3.8. Il est observé que les trois méthodes ont la même précision. Cependant, les méthodes PP et SSI-COV ont une meilleure fiabilité que la FDD. Ceci peut être expliqué par le fait que cette dernière a des meilleures performances lorsque plusieurs accéléromètres sont utilisés. Les deux autres méthodes ont des performances semblables. Cependant, la première est rapide et facile à implémenter alors que la seconde est coûteuse en temps de calcul et difficile à calibrer. Par ailleurs, la précision de la méthode PP est parfaitement acceptable pour l'application qui nous intéresse. En la choisissant, une marge raisonnable est conservée pour les erreurs expérimentales.

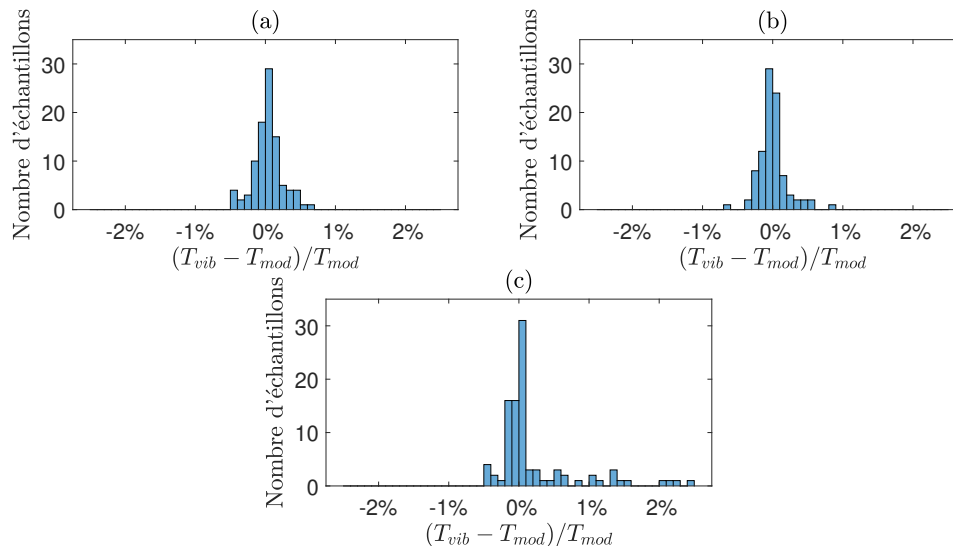


Figure 3.19 Différence relative entre la tension mécanique estimée et T_{mod} : (a) PP ; (b) SSI-COV ; (c) FDD

Tableau 3.8 Moyennes et écarts-types des histogrammes de la figure 3.19

Histogramme	Médiane	Moyenne	Écart-type
Figure 3.19a	0,04 %	0,04 %	0,20 %
Figure 3.19b	-0,03 %	-0,00 %	0,20 %
Figure 3.19c	0,03 %	0,21 %	0,60 %

3.6.4 Influence de la direction du déplacement initial du câble

En plus de critiquer la méthode du retour d'onde et d'optimiser la méthode de vibration, l'objectif de l'étude de sensibilité est de comprendre l'influence de certains paramètres. Ici, la direction du déplacement initial du câble est étudiée. Cinq cas sont choisis : \vec{e}_x , \vec{e}_y , \vec{e}_z , \vec{n} et \vec{v} . Pour rappel, \vec{e}_x , \vec{e}_y et \vec{e}_z sont les vecteurs du système de coordonnées cartésiennes global, \vec{n} est la direction orthogonale au câble dans son plan et \vec{v} est égal à $\vec{e}_x + \vec{e}_z$. Le câble est dans le plan défini par \vec{e}_y et \vec{e}_z .

Une investigation rapide montre que les directions \vec{e}_y et \vec{e}_z ne sont pas recommandées. En effet, ces directions ne sont pas “naturelles”. Par conséquent, un déplacement dans cette direction entraîne la surtension d'une portion du câble et le relâchement de l'autre portion. Dans ce cas, l'hypothèse d'élasticité du câble n'est plus valable. Par ailleurs, un utilisateur n'a pas assez de force pour effectuer un tel déplacement “à la main”.

La direction \vec{v} n'est pas recommandée non plus. En effet, un tel déplacement induit des vibrations du câble à la fois dans son plan et dans la direction orthogonale à son plan. Il est alors difficile de distinguer dans le spectre de Fourier les fréquences naturelles liées aux vibrations dans le plan de celles liées aux vibrations hors plan.

Ainsi, il reste seulement les direction \vec{e}_x et \vec{n} . Afin de les comparer, T_{PP} est évalué pour chaque combinaison de paramètres, \vec{d} étant fixé. Les histogrammes de la figure 3.20 présentent la différence relative entre T_{PP} et T_{cible}^* pour les directions \vec{e}_x et \vec{n} . Le tableau 3.9 contient les valeurs de leurs médianes, moyennes et écarts-types. La direction \vec{e}_x donne des résultats légèrement plus consistants. Cependant, comme il est compliqué d'induire un déplacement dans cette direction dans la réalité et que les résultats associés à l'autre direction sont également probants, la direction \vec{n} est privilégiée pour le déplacement initial du câble.

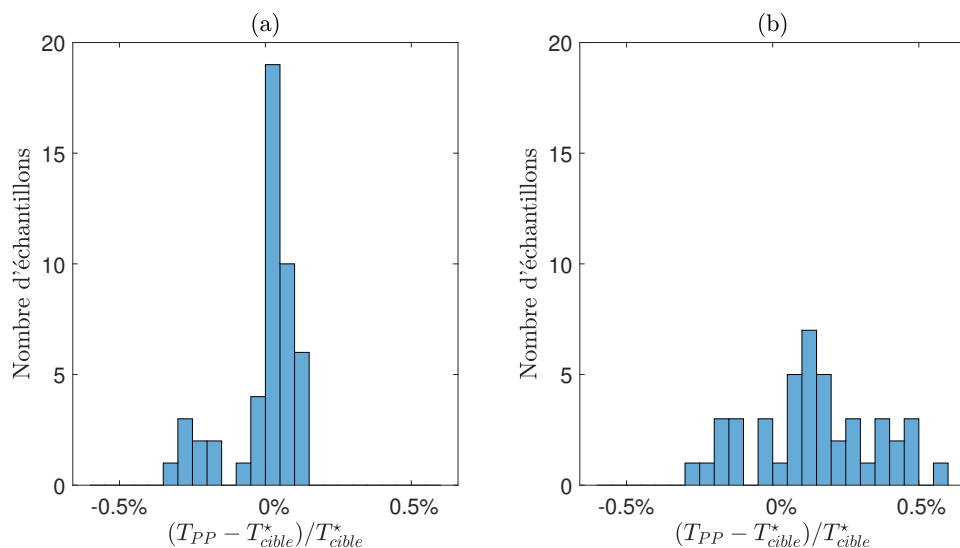


Figure 3.20 Différence relative entre la tension mécanique estimée et T_{cible}^* : (a) Direction \vec{e}_x ; (b) Direction \vec{n}

Tableau 3.9 Moyennes et écarts-types des histogrammes de la figure 3.20

Histogramme	Médiane	Moyenne	Écart-type
Figure 3.20a	0,03 %	-0,00 %	0,12 %
Figure 3.20b	0,13 %	0,14 %	0,21 %

3.6.5 Influence de l'amortissement

Le dernier résultat tiré de l'analyse de sensibilité concerne l'influence de l'amortissement. Au contraire de la tension cible ou de la direction du déplacement initial du câble, l'amortissement a une valeur fixe en pratique. Cependant, celle-ci n'est pas connue. C'est pour cela qu'elle est considérée comme une variable dans cette étude.

Les spectres de Fourier de l'accélération en un point du câble et les déplacements au même point en fonction du temps pour différents amortissements sont tracés. Les figures 3.21 et 3.22 affichent les graphes correspondant pour le hauban 1 avec une tension cible de 34,40 kN et une direction initial de déplacement \vec{n} . D'une part, l'amplitude des pics du spectre de Fourier et le nombre de fréquences sélectionnées diminuent avec l'amortissement. D'autre part, le cinquième retour d'onde ne peut plus être détecté pour $\xi \geq 2\%$. Comme ce n'est pas ce qui se passe dans la réalité, il est déduit que ξ est de l'ordre de 1%.

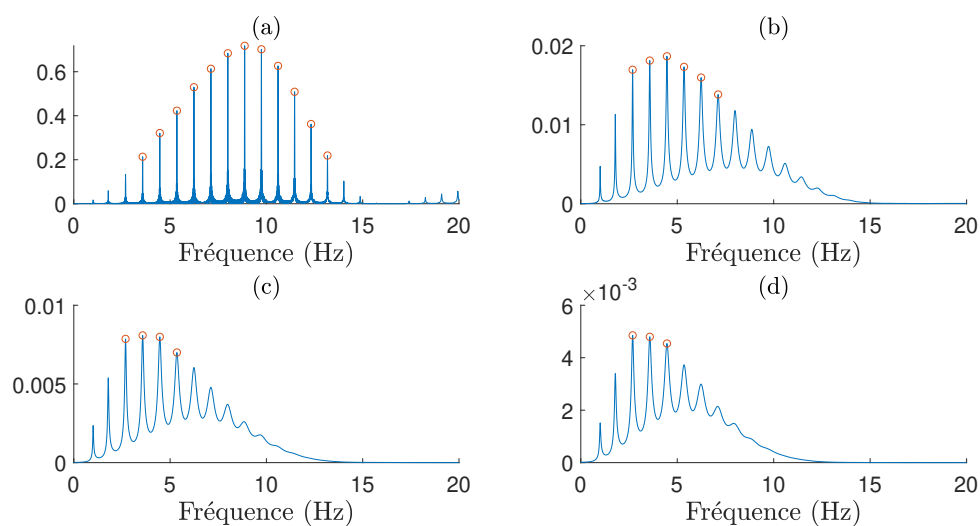


Figure 3.21 Spectre de Fourier de l'accélération en un point du câble : (a) $\xi = 0$; (b) $\xi = 0,01$; (c) $\xi = 0,02$; (d) $\xi = 0,03$

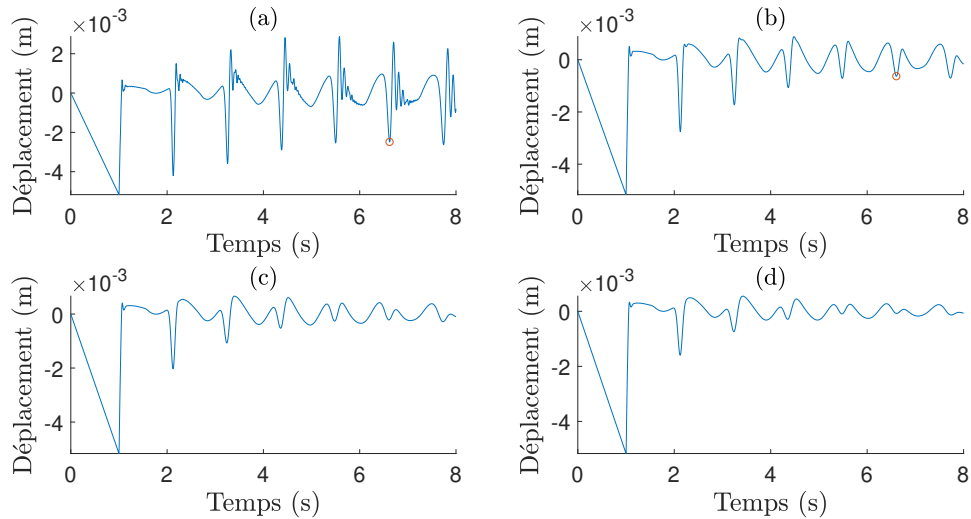


Figure 3.22 Déplacement en un point du câble en fonction du temps : (a) $\xi = 0$; (b) $\xi = 0,01$; (c) $\xi = 0,02$; (d) $\xi = 0,03$

3.7 Conclusion

Afin de mesurer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission, la méthode de vibration peut être appliquée en utilisant la méthode de sélection des pics et la formule de la corde vibrante. Bien qu'il existe des méthodes d'analyse modale et des formules simples plus complexes, il a été montré que celles qui sont choisies sont suffisamment précises et robustes pour l'application souhaitée. Leurs avantages principaux sont leur facilité d'implémentation et leur rapidité. Ce dernier point est primordial pour une utilisation optimale du procédé.

La méthode de vibration ainsi optimisée constitue la nouvelle technique. Celle-ci doit désormais être implémentée afin de permettre une utilisation rapide, facile et systématique. Pour cela, une application pour téléphone intelligent est conçue. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4 CONCEPTION D'UNE APPLICATION POUR TÉLÉPHONE INTELLIGENT PERMETTANT D'IMPLÉMENTER LA NOUVELLE TECHNIQUE

4.1 Objectifs et méthodologie

Dans la partie 3, une nouvelle technique permettant de mesurer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission a été développée. Présentement, afin de la mettre en œuvre, il faut mesurer l'accélération du câble en un point à l'aide d'un dispositif d'acquisition (accéléromètre, vibromètre laser), exporter les données sur un ordinateur et effectuer le post-traitement en utilisant les algorithmes développés sous Matlab. Cette procédure étant longue et laborieuse, il faut la simplifier et l'automatiser. Pour cela, une application pour téléphone intelligent est développée. L'objectif est de regrouper l'acquisition, le post-traitement et la sauvegarde des données au sein d'un même appareil. Ainsi, la nouvelle technique peut être implémentée en suivant les quatre étapes présentées à la figure 4.1. À noter que la photographie de la fixation du téléphone intelligent sur le hauban (étape 1) ne correspond pas au choix d'attache présenté au chapitre 5.

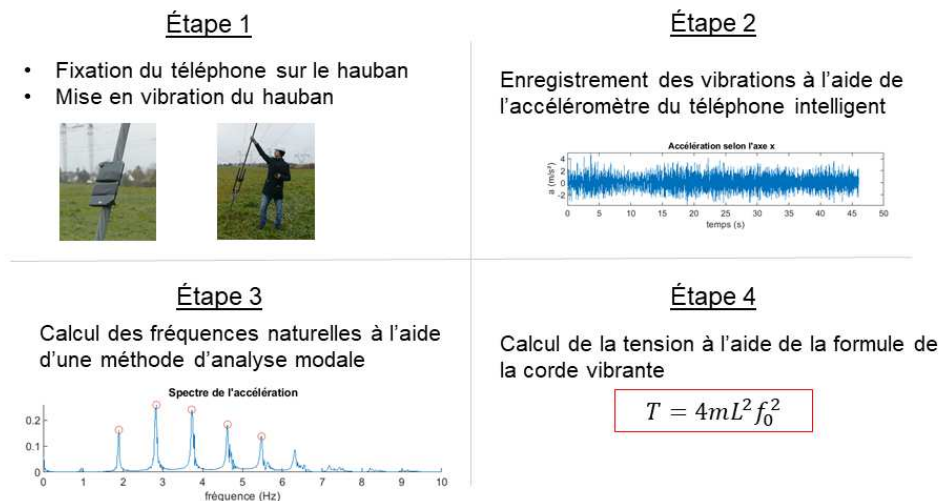


Figure 4.1 Étapes de la nouvelle technique

Afin de permettre un plus grand choix de téléphones intelligents, l'application est développée sous Android [47]. Android est un système d'exploitation mobile développé par l'Open Handset Alliance, un consortium de plus de 80 entreprises créé à l'initiative de Google. Ce

système d'exploitation mobile est utilisé par plus de 80 % des téléphones intelligents, c'est pourquoi nous l'avons choisi.

Le développement de l'application se fait en deux étapes. Dans un premier temps, il faut programmer les algorithmes de post-traitement en Java [48], le langage de programmation utilisé par Android. Pour cela, l'environnement de développement Eclipse [49] est utilisé. Dans un second temps, l'interface de l'application doit être conçue. Google propose un environnement adapté appelé Android Studio [50]. Ainsi, les outils utilisés pour la conception sont le langage de programmation Java et les environnements de développement Eclipse et Android Studio.

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'application pour téléphone intelligent. La section 4.2 décrit les algorithmes de post-traitement en Java et la section 4.3 montre l'interface de l'application, ses caractéristiques et les améliorations envisageables. Enfin, la section 4.4 décrit une série de tests permettant de vérifier le bon fonctionnement de l'application.

4.2 Développement des algorithmes en Java

4.2.1 Quelques notions d'informatique

Avant d'expliquer le développement des algorithmes en Java, commençons par rappeler quelques notions d'informatique indispensables à la compréhension de cette section.

Java est un langage de Programmation Orientée Objet (POO). Cela signifie que l'entité de base de ce langage est l'objet. Contrairement à la programmation classique dite procédurale, la POO encapsule l'ensemble du programme dans des objets. Chaque objet est un concept abstrait. Il peut contenir des données appelées *attributs* et des fonctions appelées *méthodes*.

Le morceau de code décrivant un objet est appelé *classe*. À partir d'une classe, un ou plusieurs objets peuvent être *instanciés*, c'est-à-dire créés. Les différentes classes peuvent interagir entre elles. Par exemple, une classe peut avoir pour attribut une autre classe. Dans certains cas, une classe peut faire appel aux méthodes d'une autre classe. Enfin, un dossier contenant une ou plusieurs classes est appelé *paquet*.

4.2.2 Caractéristiques et architecture globale du programme

Matlab n'étant pas un langage de programmation orienté objet, il a fallu repenser l'architecture globale du programme lors de la réécriture des algorithmes en Java.

Commençons par présenter les caractéristiques principales du programme. Ce projet représente environ 2200 lignes divisées en 18 classes, elles-mêmes réparties dans 4 paquets. Les entrées et les sorties sont les mêmes que celles du programme Matlab. En entrée, un tableau à 4 colonnes représentant l'accélération est donné : la première colonne affiche les pas de temps, les trois autres affichent l'accélération selon les directions \vec{e}_x , \vec{e}_y et \vec{e}_z . Les paramètres du post-traitement sont également donnés, c'est-à-dire la longueur du câble, la longueur de l'ancrage, la masse linéique, le temps d'acquisition, le choix des méthodes d'analyse modale ainsi que les constantes des algorithmes de post-traitement telles que la fréquence minimale entre deux pics, la valeur du critère de stabilisation ou l'ordre de la méthode SSI-COV (voir chapitre 3). En sortie, trois valeurs sont récupérées pour chaque méthode d'analyse modale choisie : la fréquence fondamentale, la tension mécanique et le temps de calcul.

L'architecture globale du programme est présentée à la figure 4.2. Cette figure est appelée diagramme de classes. Elle représente l'ensemble des paquets, des classes et des interactions. Pour chaque classe, le diagramme indique les attributs (nom et type) et les méthodes (nom et type de la sortie). Par exemple, la classe `FFT` du paquet `main` possède :

- un attribut de type entier nommé `n` ;
- une méthode `fft()` qui ne renvoie rien ;
- une méthode `ifft()` qui ne renvoie rien ;
- une méthode `obtenirSpectre()` qui renvoie un tableau de nombres réels ;
- une méthode `obtenirFreq()` qui renvoie un tableau de nombres réels.

Par ailleurs, un diagramme très simplifié est présenté à la figure 4.3. Les quatre paquets suivants sont observés : `main`, `selectiondespics`, `ssicov` et `fdd`. De plus, les interactions matérialisées par les lignes continues montrent que `main` fait appel à `selectiondespics`, `ssicov` et `fdd`. Ainsi, chacun des trois derniers paquets contient le programme permettant d'effectuer une méthode d'analyse modale (PP, SSI-COV ou FDD) et `main` permet de réunir tout le programme dans une seule méthode facilement utilisable : la méthode `postTraitement()` de la classe `Main`. Les classes de chaque paquet seront détaillées dans la section suivante.

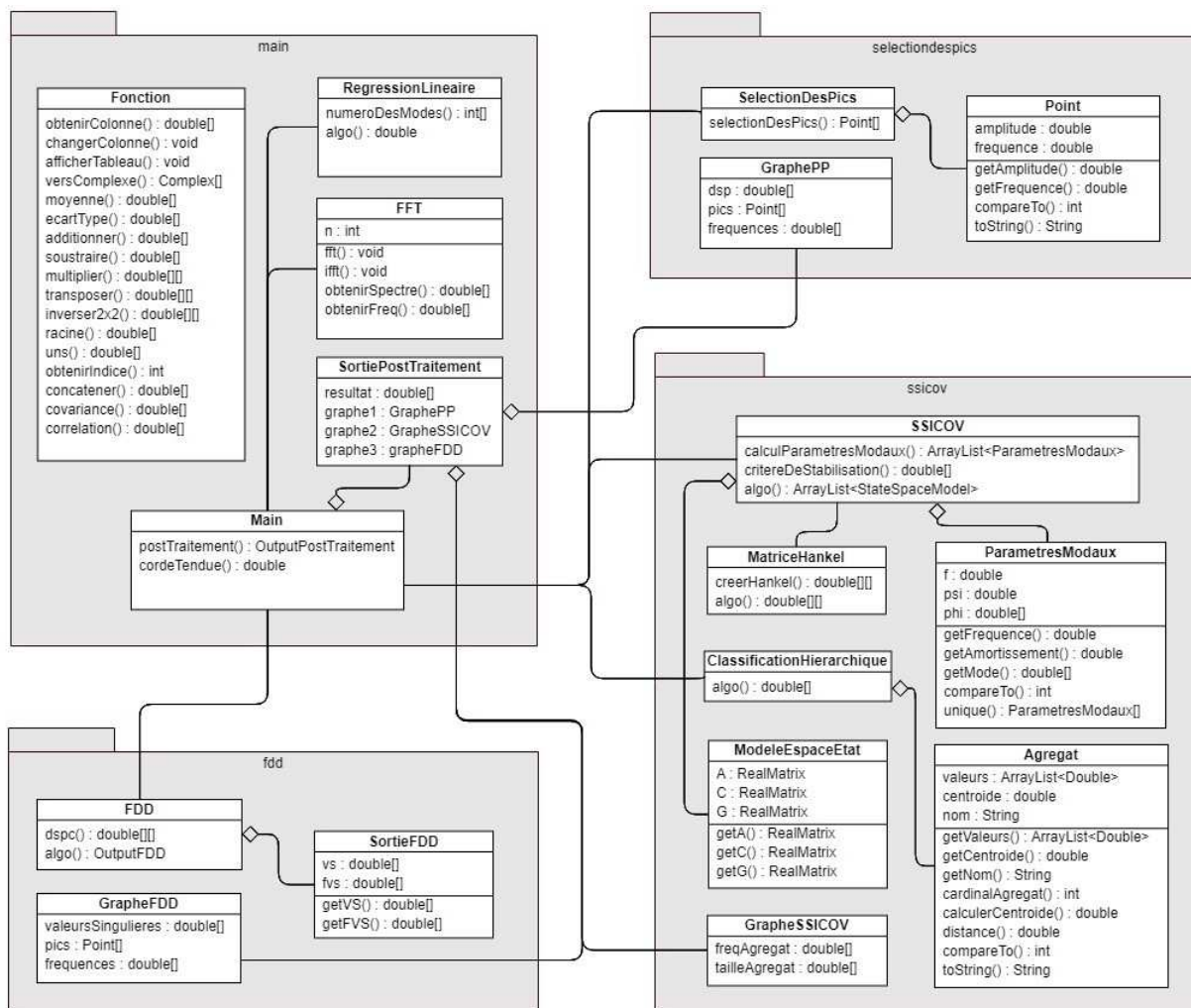


Figure 4.2 Diagramme de classe

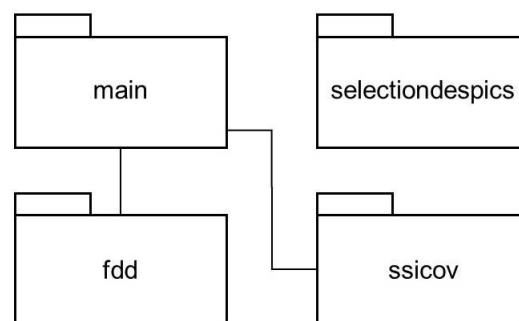


Figure 4.3 Diagramme de classe simplifié

4.2.3 Liste des paquets et des classes

Tableau 4.1 Paquets et classes des algorithmes en Java

Nom du paquet	Nom de la classe	Description de la classe
main	Main	Contient la méthode <code>postTraitement()</code>
	SortiePostTraitement	Sortie de la méthode <code>postTraitement()</code>
	FFT	Algorithme de FFT
	RegressionLineaire	Algorithme de régression linéaire
	Fonction	Fonctions pour le calcul matriciel et l'affichage
selectiondespics	SelectionDesPics	Algorithme de PP
	Point	Définition d'un point dans le spectre de Fourier
	GraphePP	Définition du graphe de sélection des pics
ssicov	SSICOV	Algorithme de SSI-COV
	MatriceHankel	Construction d'une matrice de Hankel
	ParametresModaux	Définition des paramètres modaux
	ModeleEspaceEtat	Définition d'un modèle espace-état
	ClassificationHierarchique	Algorithme de classification hiérarchique
	Agregat	Définition d'un agrégat de fréquences
	GrapheSSICOV	Définition de l'histogramme des fréquences
fdd	FDD	Algorithme de FDD
	SortieFDD	Définition de la sortie de l'algorithme de FDD
	GrapheFDD	Définition de la courbe des valeurs singulières

Chaque paquet contient un certain nombre de classes ayant des fonctions bien précises (voir tableau 4.1) :

- **main** : la classe `Main` contient la méthode `postTraitement()` qui est appelée par l'application Android et qui renvoie un objet défini par la classe `SortiePostTraitement`, les classes `FFT` et `RegressionLineaire` définissent les algorithmes éponymes et la classe `Fonction` regroupe des méthodes simples utilisées dans le reste du programme.
- **selectiondespics** : la classe `SelectionDesPics` définit l'algorithme éponyme, la classe `Point` représente un point dans le spectre de Fourier et la classe `GraphePP` contient des informations permettant de tracer le graphe de sélection des pics.
- **ssicov** : les classes `SSICOV` et `ClassificationHierarchique` définissent les algorithmes éponymes et utilisent les objets représentés par les classes `ParametresModaux`, `ModeleEspaceEtat` et `Agregat`, la classe `GrapheSSICOV` contient des informations permettant de tracer l'histogramme des fréquences.
- **fdd** : la classe `FDD` définit l'algorithme éponyme, la classe `SortieFDD` encapsule les valeurs en sortie de l'algorithme et la classe `GrapheFDD` contient des informations permettant de tracer la courbe des valeurs singulières.

Les informations données ci-dessus peuvent être recoupées avec celles du digramme de classe.

4.3 Création de l'interface à l'aide d'Android Studio

Une fois que les algorithmes sont programmés en Java à l'aide d'Eclipse, Android Studio est utilisé pour concevoir l'interface de l'application et y inclure les algorithmes.

4.3.1 Architecture globale de l'application

L'application pour téléphone intelligent doit pouvoir être utilisée par des techniciens en conditions réelles, c'est-à-dire en extérieur et avec une météo parfois défavorable (froid, vent, pluie). Il faut donc que celle-ci soit la plus simple d'utilisation possible. De plus, l'application doit avoir au minimum deux fonctions : une fonction permettant d'effectuer une mesure et une autre permettant de consulter l'ensemble des mesures réalisées.

L'architecture globale de l'application est illustrée à la figure 4.4. Les rectangles désignent une page de l'application et les flèches illustrent les liens qui les relient. Ainsi, cinq pages sont accessibles depuis le menu principal (voir figure 4.5). La première permet à l'utilisateur de choisir les paramètres avant de lancer une mesure. La deuxième permet à l'utilisateur de consulter l'historique des mesures. L'affichage des résultats d'une mesure en particulier se fait sur une nouvelle page. La troisième contient le mode d'emploi de l'application. La quatrième donne des informations complémentaires qui peuvent être utiles à l'utilisateur. Enfin, la cinquième page fournit des renseignements sur le contexte de l'application. De plus amples détails sont donnés dans les sections suivantes.

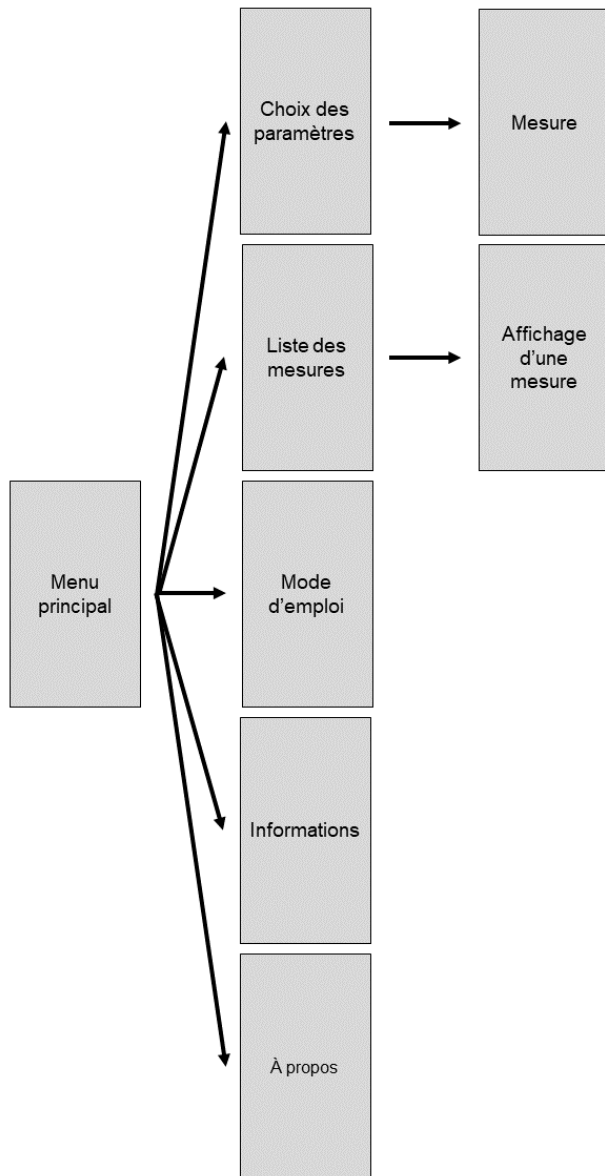


Figure 4.4 Architecture globale de l'application

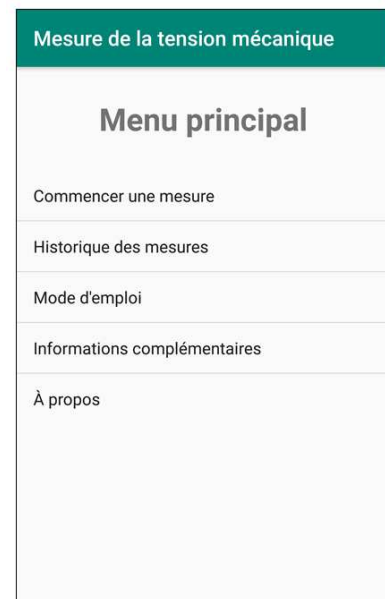


Figure 4.5 Capture d'écran du Menu principal

4.3.2 Commencer une mesure

Cliquer sur “Commencer une mesure” dans le menu principal (figure 4.5) permet de lancer la page de choix des paramètres (figure 4.6). Cette page permet à l'utilisateur de choisir les paramètres de la mesure avant de la lancer. Ceux-ci correspondent soit aux entrées de la fonction `postTraitement()` définies dans la section 4.2, soit à certaines options de mesure. Il y a deux catégories de paramètres à renseigner : les paramètres généraux et les paramètres avancés. Si les paramètres généraux doivent être modifiés avant chaque mesure, il est déconseillé à un utilisateur non averti de modifier les paramètres avancés. En effet, il s'agit des constantes des algorithmes de post-traitement. Ils sont calibrés grâce aux études effectuées dans les chapitres 3 et 5. La signification de chaque paramètre est donnée à l'annexe A. À noter que l'option “Déclenchement auto” permet de lancer automatiquement la mesure lorsque la première vibration du câble est détectée.

Mesure de la tension mécanique	Mesure de la tension mécanique	Mesure de la tension mécanique
Choix des paramètres		
Paramètres généraux		
Longueur du câble	54.5592	
Longueur de l'ancrage	1.46	
Masse linéique	3.429	
Technique numérique	<input checked="" type="checkbox"/> Sélection des pics <input checked="" type="checkbox"/> SSI-COV <input checked="" type="checkbox"/> FDD	
Déclenchement auto	<input checked="" type="radio"/> oui <input type="radio"/> non	
Sauvegardé externe	<input checked="" type="radio"/> oui <input type="radio"/> non	
Paramètres avancés		
Temps d'acquisition	60	
Retard	2	
Accélération limite	4	
(M1) Fréquence max	10	
(M1) Fréquence min	0.5	
(M1) Puissance	18	
(M1) Critère c	3	
(M2) Fréquence max	10	
(M2) Ordre	100	
(M2) Résolution	0.01	
(M2) Erreur max 1	0.001	
(M2) Erreur max 2	0.05	
(M2) Fréquence max	10	
(M3) Puissance	18	
(M3) Critère c	1.5	
<input type="button" value="VALIDER"/> <input type="button" value="RETOUR"/> <input type="button" value="EFFACER"/>		
Effectuer la mesure		
<input type="button" value="COMMENCER"/>		

Figure 4.6 Captures d'écran de la page Choix des paramètres

La page comporte les boutons `VALIDER`, `RETOUR`, `EFFACER` et `COMMENCER` :

- le bouton `VALIDER` permet de valider les paramètres. Si certains paramètres sont manquants, un message d'erreur s'affiche. Lorsque les paramètres sont validés, le bouton `VALIDER` est désactivé et les boutons `RETOUR` et `COMMENCER` sont activés.
- le bouton `RETOUR` permet d'annuler la validation des paramètres : le bouton `VALIDER` est réactivé et les boutons `RETOUR` et `COMMENCER` sont désactivés.
- le bouton `EFFACER` permet de remettre à zéro les paramètres : les paramètres généraux sont effacés, les paramètres avancés sont réinitialisés à leur valeur par défaut et, le cas

échéant, le bouton VALIDER est réactivé et les boutons RETOUR et COMMENCER sont désactivés.

- le bouton COMMENCER permet de changer de page et de lancer la mesure.

Après avoir appuyé sur le bouton COMMENCER, la page de mesure est lancée. Sur cette page, trois affichages successifs vont s’effectuer. Ces affichages sont visibles à la figure 4.7. Tout d’abord, un compte à rebours se présente à l’écran. Celui-ci débute à la valeur du temps d’acquisition défini à la page de choix des paramètres. Pendant que le compte à rebours défile, l’application accède à l’accéléromètre du téléphone intelligent et enregistre les données. Lorsque le compte arrive à zéro, l’enregistrement s’arrête et le post-traitement débute. L’application appelle la méthode `postTraitement()` du programme Java en lui donnant en entrée l’accélération enregistrée et les paramètres choisis précédemment. Pendant ce temps, l’écran affiche une barre de progression pour faire patienter l’utilisateur. Une fois que les calculs sont achevés, les résultats sont affichés à l’écran. Ils comprennent le graphe des accélérations selon \vec{e}_x , \vec{e}_y et \vec{e}_z ainsi que la fréquence fondamentale f_0 , la tension mécanique T , le temps de calcul t et un graphe pour chaque méthode d’analyse modale choisie.

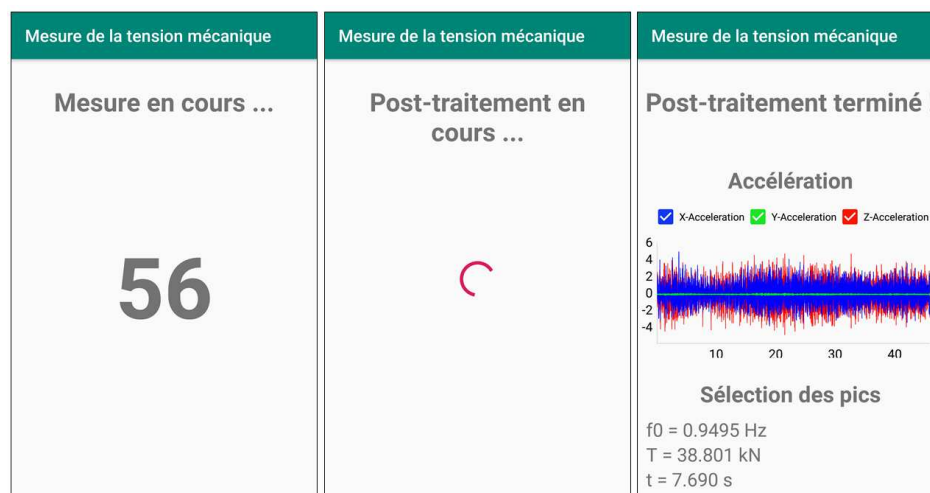


Figure 4.7 Captures d’écran de la page Mesure - Affichages successifs

Un exemple de résultat pour les méthodes PP, SSI-COV et FDD est donné à la figure 4.8. Les graphes affichés sont respectivement le graphe de sélection des pics, l’histogramme des fréquences et la courbe de la première valeur singulière.

Les résultats des mesures sont automatiquement enregistrés dans le téléphone. Ils sont accessibles à partir du menu principal en cliquant sur “Historique des mesures”.

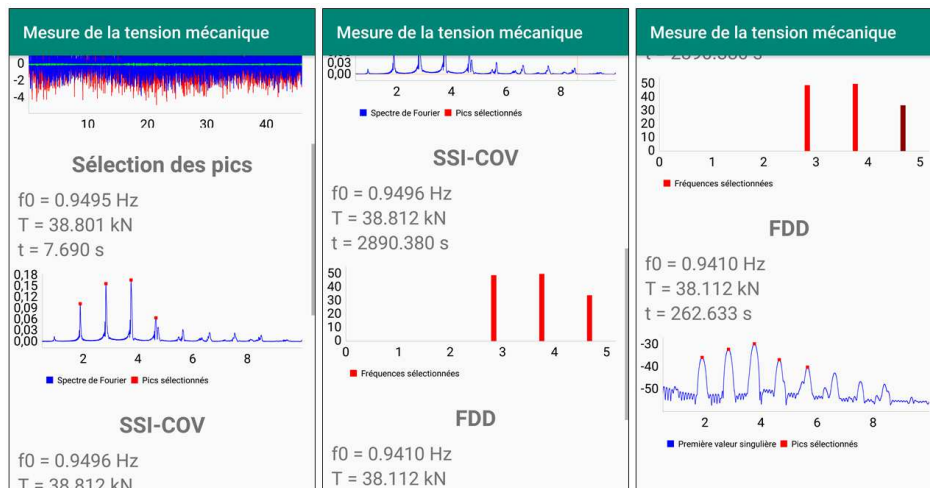


Figure 4.8 Captures d'écran de la page Mesure - Résultats

4.3.3 Historique des mesures

Cliquer sur “Historique des mesures” dans le menu principal (figure 4.5) permet de lancer la page faisant la liste des mesures effectuées (figure 4.9). Chaque mesure est caractérisée par la date et l'heure auxquelles elle a été effectuée. Par exemple, le premier item de la liste visible à la figure 4.9 correspond à la mesure effectuée le 15 août 2019 à 12h13. À noter que la liste est ordonnée dans l'ordre antichronologique.

Mesure de la tension mécanique		
Historique des mesures		
AFFICHER	SUPPRIMER	TOUT SÉLECTIONNER
15/08/2019 12h13		<input type="checkbox"/>
15/08/2019 12h04		<input type="checkbox"/>
15/08/2019 11h55		<input type="checkbox"/>
15/08/2019 11h47		<input type="checkbox"/>
15/08/2019 11h35		<input type="checkbox"/>
15/08/2019 11h28		<input type="checkbox"/>
15/08/2019 11h13		<input type="checkbox"/>
15/08/2019 11h06		<input type="checkbox"/>

Figure 4.9 Capture d'écran de la page Liste des mesures

Comme la page de choix des paramètres, la page listant les mesures comporte des boutons : AFFICHER, SUPPRIMER et TOUT SÉLECTIONNER. Leurs rôles sont les suivants :

- le bouton AFFICHER permet d'afficher les résultats de l'item sélectionné. Si aucun item n'est sélectionné ou si plusieurs items sont sélectionnés, un message d'erreur s'affiche.
- le bouton SUPPRIMER permet de supprimer de l'historique le ou les items sélectionnés. Si aucun item n'est sélectionné, un message d'erreur s'affiche.
- le bouton TOUT SÉLECTIONNER permet de sélectionner / désélectionner toute la liste.

L'affichage d'une mesure se fait sur une nouvelle page. Après avoir sélectionné un unique item et appuyé sur le bouton AFFICHER, la page visible à la figure 4.10 est lancée. Celle-ci contient le nom de la mesure (couple date-heure), les paramètres généraux (longueur du câble, longueur de l'ancrage, masse linéique), le graphe des accélérations et les résultats (fréquence fondamentale, tension mécanique, temps de calcul et graphe) pour chaque méthode d'analyse modale choisie. Dans le cas de la figure 4.10, seul le résultat pour la méthode PP est montré. Pour consulter une autre mesure, l'utilisateur doit appuyer sur la flèche de retour, sélectionner un nouvel item et appuyer sur le bouton AFFICHER.

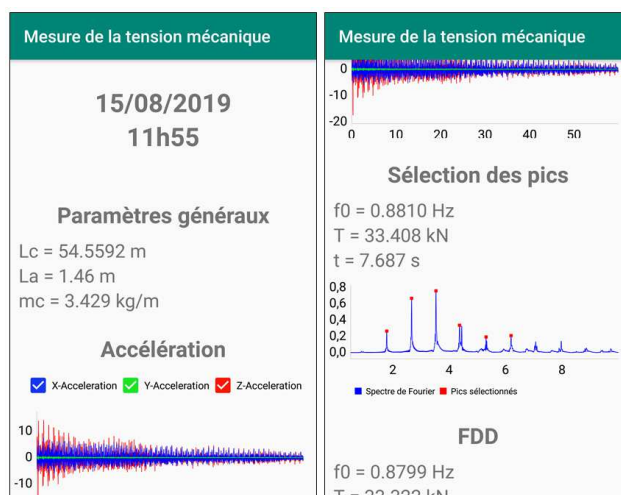


Figure 4.10 Captures d'écran de la page Affichage d'une mesure

4.3.4 Mode d'emploi, Informations complémentaires, À propos

Les trois dernières pages accessibles depuis le menu principal (figure 4.5) sont les pages “Mode d'emploi”, “Informations complémentaires” et “À propos”.

La page “Mode d'emploi” (figure 4.11) permet à l'utilisateur d'obtenir des informations sur le fonctionnement de l'application. Plus précisément, elle contient trois tutoriels expliquant respectivement comment effectuer une mesure, comment consulter l'historique des mesures et ce que signifie les paramètres qu'il faut renseigner avant de commencer une mesure. Le titre de chaque tutoriel est inscrit sur un bouton. Lorsque l'utilisateur appuie sur ce bouton, le tutoriel apparaît en dessous. Lorsqu'il appuie à nouveau sur le bouton, le tutoriel disparaît. Les textes de la page “Mode d'emploi” sont disponibles à l'annexe A.

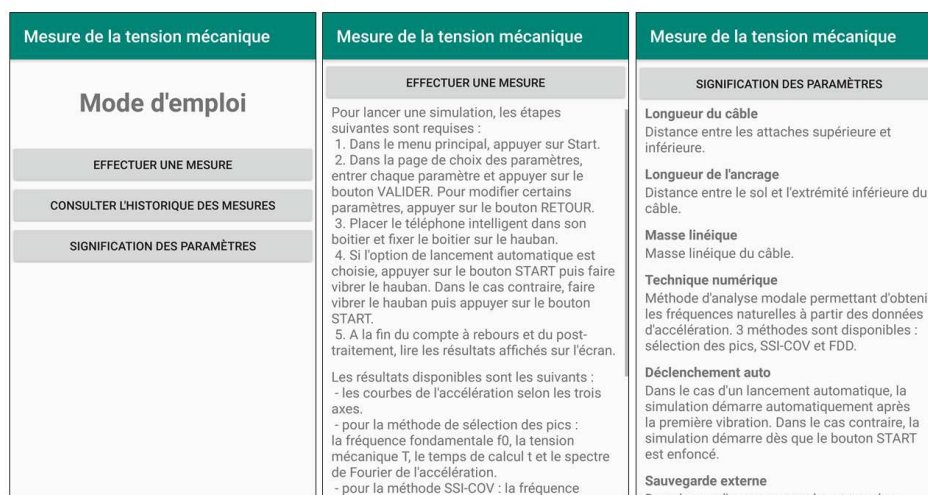


Figure 4.11 Captures d'écran de la page Mode d'emploi

La page “Informations complémentaires” (figure 4.12) fournit des informations spécifiques à la maintenance des haubans des lignes de transmission d'Hydro-Québec. En particulier, elle indique les différents types de câble que l'utilisateur peut rencontrer et les tensions optimales des haubans. Comme pour la page “Mode d'emploi”, les informations apparaissent et disparaissent lorsque l'utilisateur appuie sur les boutons correspondants.

Enfin, la page “À Propos” (figure 4.13) explique le cadre dans lequel l'application a été développée et indique à qui incombe la responsabilité lors de l'utilisation de l'application. Le texte de cette page est disponible à l'annexe B.

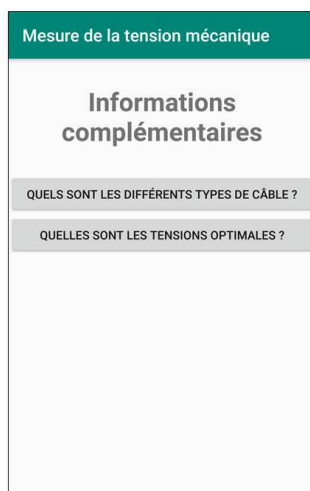


Figure 4.12 Capture d'écran de la page Informations complémentaires



Figure 4.13 Capture d'écran de la page À Propos

4.3.5 Caractéristiques de l'application et améliorations envisageables

Maintenant que les deux branches de l'application ont été présentées, revenons sur quelques caractéristiques importantes. Le programme de l'interface représente environ 5000 lignes réparties entre un langage de programmation (Java) et un langage de balisage (XML). Contrairement au langage de programmation, le langage de balisage ne donne pas d'instruction à l'ordinateur. Il sert seulement à ordonner des informations. Ainsi, les fichiers XML sont lus par Java afin d'être compris par l'application. Le programme de notre interface comprend 12 classes Java et 14 fichiers XML. Ceux-ci sont résumés dans les tableaux 4.2 et 4.3.

Tableau 4.2 Classes Java de l'interface Android

Nom du paquet	Nom de la classe	Description de la classe
activity	MainActivity	Menu principal
	ParametresActivity	Page Choix des paramètres
	ListeParametres	Définition des paramètres du post-traitement
	MesureActivity	Page Mesure (configuration 1)
	MesureActivityAuto	Page Mesure (configuration 2)
	SauvegardeMesure	Définition des résultats d'une mesure
	HistoriqueActivity	Page Liste des mesures
	ResultatActivity	Page Affichage d'une mesure
	ModeEmploiActivity	Page Mode d'emploi
	InfoActivity	Page Informations complémentaires
	AboutActivity	Page À Propos
	Affichage	Fonctions pour l'affichage des textes et des graphes

Tableau 4.3 Fichiers XML de l'interface Android

Nom du dossier	Nom du fichier	Description du fichier
main	AndroidManifest.xml	Options du projet
res/layout	activity_main.xml	Menu principal
	activity_parametres.xml	Page Choix des paramètres
	activity_mesure.xml	Page Mesure (configuration 1)
	activity_mesure_auto.xml	Page Mesure (configuration 2)
	activity_historique.xml	Page Liste des mesures
	activity_resultat.xml	Page Affichage d'une mesure
	activity_mode_emploi.xml	Page Mode d'emploi
	activity_info.xml	Page Informations complémentaires
res/values	activity_about.xml	Page À Propos
	colors.xml	Couleurs
	strings.xml	Textes
res/values-en	styles.xml	Styles des textes
	strings.xml	Textes en anglais

D'une part, les 12 classes sont toutes contenues dans le paquet `activity`. Neuf d'entre elles représentent une *activité*, c'est-à-dire le code d'une page. En particulier, les classes `MesureActivity` et `MesureActivityAuto` représentent la même page dans deux configurations différentes : sans et avec l'option de déclenchement automatique respectivement. Les trois classes restantes définissent un objet encapsulant les paramètres du post-traitement, un objet encapsulant les résultats d'une mesure et des méthodes permettant l'affichage des textes et des graphes. D'autre part, les 14 fichiers XML contiennent des informations complémentaires et sont répartis dans les dossiers `main` et `res` et les sous-dossiers `layout`, `values` et `values-en`. Le dossier `res/layout` contient des informations sur le positionnement et la taille des textes et des boutons de chaque page. Les fichiers `strings.xml` des dossiers `values` et `values-en` contiennent l'ensemble des textes de l'application respectivement en français et en anglais. Les fichiers `colors.xml` et `styles.xml` détaillent respectivement les couleurs de l'application et les styles des textes (taille, gras, italique). Enfin, `AndroidManifest.xml` contient de multiples informations indispensables au bon fonctionnement de l'application : nom, permissions, matériel obligatoire, lien entre les activités ...

Les fichiers XML permettent d'ajouter certaines options à l'application afin de faciliter son utilisation. Tout d'abord, celle-ci est disponible en français et en anglais. Ensuite, l'affichage se fait seulement en mode portrait. Enfin, la mise en veille automatique du téléphone est désactivée lorsque l'utilisateur navigue sur les pages de choix des paramètres et de mesure.

Par ailleurs, l'application peut encore être améliorée. Trois axes d'amélioration envisageables sont proposés :

- ajouter un menu d'option ;
- améliorer le design de l'application ;
- utiliser le GPS pour localiser chaque mesure.

4.4 Tests préliminaires

Une fois l'application conçue, il est important d'effectuer certains tests préliminaires pour vérifier son bon fonctionnement. Bien entendu, ces tests ne peuvent pas se substituer à une vérification complète avec des essais in situ.

4.4.1 Test de fonctionnement de l'accéléromètre

Commençons par vérifier le bon fonctionnement de l'accéléromètre. Pour cela, deux applications mobiles sont téléchargées sur un téléphone intelligent : l'application développée et Physics Toolbox Sensor Suite [51]. Cette dernière est disponible gratuitement sur le Play Store. Elle a été développée par Vieyra Software. Elle permet d'accéder à différents capteurs du cellulaire dont l'accéléromètre. L'idée du test est de lancer simultanément les deux applications, de faire vibrer le téléphone, d'enregistrer l'accélération selon les 3 axes, d'exporter les données sur ordinateur et d'afficher les graphes afin de les comparer.

Le téléphone utilisé est un LG G4. Les vibrations sont enregistrées pendant 30 s. Des signaux de 6064 points sont obtenus, ce qui signifie que la fréquence d'acquisition de l'accéléromètre du LG G4 est d'environ 202 Hz. Les résultats du test sont illustrés sur la figure 4.14. Dans un premier temps, les graphes de l'accélération selon les 3 axes obtenus avec l'application personnelle (4.14a) et avec Physics Toolbox Sensor Suite (4.14b) sont affichés. Bien que les signaux aient la même allure, les courbes du premier graphe sont décalées selon les ordonnées. Par conséquent, les mêmes signaux sont affichés en supprimant l'offset, c'est-à-dire en retranchant à chaque point la moyenne du signal correspondant. Après cette opération, les graphes obtenus avec l'application personnelle (4.14c) se superposent parfaitement avec les graphes obtenus avec Physics Toolbox Sensor Suite. Par conséquent, la gestion de l'accéléromètre par l'application conçue est correcte. Il faut simplement penser à éliminer le potentiel offset avant d'appliquer les méthodes d'analyse modale.

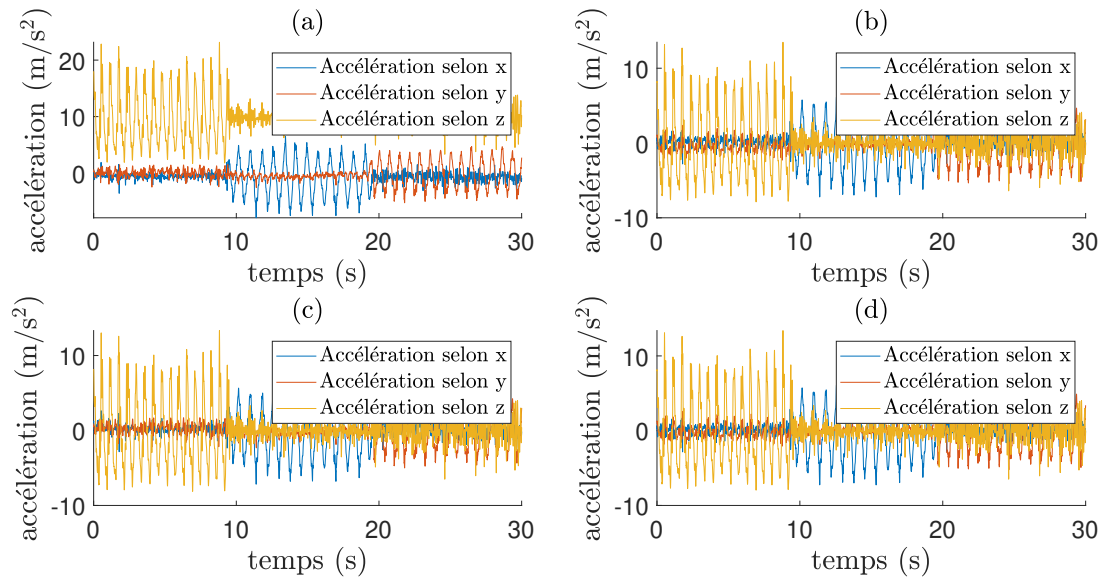


Figure 4.14 Graphes des accélérations mesurées avec un téléphone intelligent : (a) Application personnelle - Signaux avec offset ; (b) Physics Toolbox - Signaux avec offset ; (c) Application personnelle - Signaux sans offset ; (d) Physics Toolbox - Signaux sans offset

4.4.2 Test de fonctionnement des algorithmes Java au sein de l'application

Dans le chapitre 3, plusieurs essais préliminaires en conditions réelles ont été évoqués (voir section 3.2.2). Ces expériences ont été réalisées à Terrebonne à trois périodes de l'année : été, automne et hiver. Lors des expériences automnales, des essais de vibration ont été effectués : pour chacun des quatre haubans du pylône, l'accélération est mesurée à l'aide de l'accéléromètre d'un téléphone intelligent (LG G4). Les données d'accélération sont ensuite exportées sur ordinateur et la tension mécanique du hauban est estimée à l'aide des algorithmes de post-traitement Matlab.

Dans le but de tester le fonctionnement des algorithmes Java au sein de l'application Android, les mêmes données d'accélération sont utilisées. En tout, il y a 6 signaux : un pour le hauban 1, un pour le hauban 2, deux pour le hauban 3 et deux pour le hauban 4. Ces signaux font entre 38 s et 67 s. Les graphes des accélérations selon l'axe \vec{e}_x sont affichés à la figure 4.15. Le principe du test est de post-traiter ces données de trois façons différentes : par ordinateur avec les algorithmes Matlab ; par ordinateur avec les algorithmes Java ; par téléphone intelligent avec l'application Android. À chaque fois, les méthodes d'analyse modale PP et FDD sont utilisées.

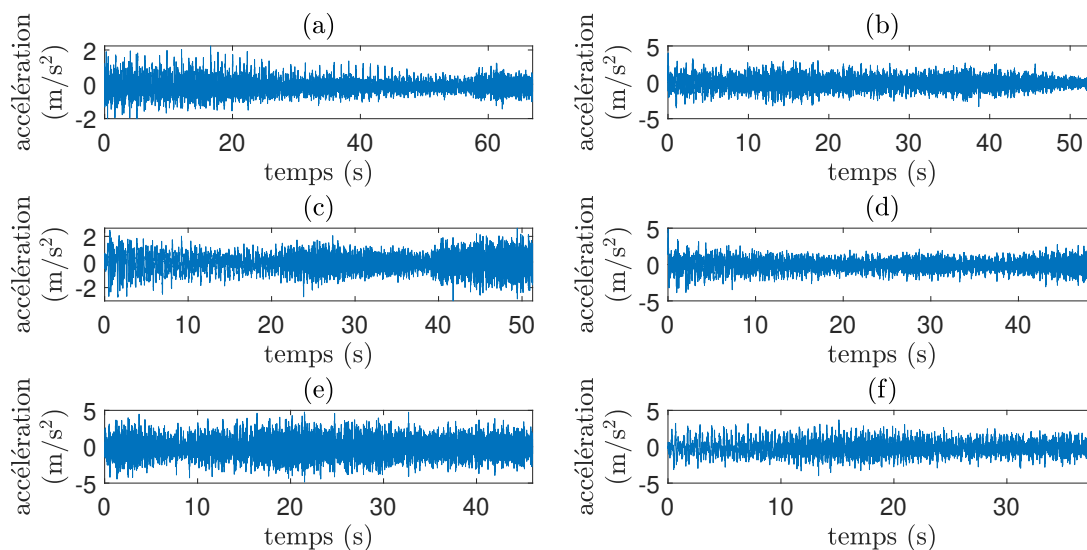


Figure 4.15 Signaux d'accélération selon l'axe \vec{e}_x enregistrés lors des essais préliminaires à Terrebonne : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 - Essai 1 ; (d) Hauban 3 - Essai 2 ; (e) Hauban 4 - Essai 1 ; (f) Hauban 4 - Essai 2

Les résultats du test sont disponibles dans le tableau 4.4. D'une part, les résultats sont les mêmes quel que soit le type de post-traitement (Matlab, Java ou Android) lorsque le PP est choisi comme méthode d'analyse modale. D'autre part, les résultats obtenus avec Java et Android sont les mêmes mais différent des résultats obtenus avec Matlab lorsque la FDD est choisie comme méthode d'analyse modale. Cela vient du fait qu'il a fallu légèrement modifier l'algorithme de FDD lors de sa programmation en Java. En effet, les algorithmes Matlab utilisent la fonction intrinsèque `cpsd` pour calculer la densité spectrale de puissance croisée. Le code de cette fonction n'étant pas disponible, l'algorithme exact choisi par les équipes de développement de Matlab pour calculer cette grandeur n'est pas connu. Par conséquent, il est probable que l'algorithme choisi pour le programme Java soit légèrement différent, ce qui explique l'écart entre les résultats. Cependant, cet écart est très faible : 2,2 % pour le premier essai du hauban 4, 0,9 % pour le second essai du hauban 4 et moins de 0,4 % pour les quatre autres essais. De plus, les études du chapitre 3 montrent que la méthode PP est privilégiée. Ainsi, les algorithmes transférés au sein de l'application Android semblent fonctionner.

Tableau 4.4 Résultats du test de fonctionnement des algorithmes Java au sein de l'application

Numéro de l'essai	Méthode de post-traitement	Tension (kN)	
		PP	FDD
Hauban 1	Matlab	34,468	34,484
	Java	34,464	34,351
	Android	34,468	34,355
Hauban 2	Matlab	34,345	34,366
	Java	34,345	34,329
	Android	34,345	34,329
Hauban 3 Essai 1	Matlab	37,001	36,846
	Java	37,001	36,734
	Android	37,001	36,734
Hauban 3 Essai 2	Matlab	37,387	37,421
	Java	37,387	37,371
	Android	37,387	37,371
Hauban 4 Essai 1	Matlab	38,801	38,949
	Java	38,801	38,111
	Android	38,801	38,111
Hauban 4 Essai 2	Matlab	38,919	38,713
	Java	38,919	38,380
	Android	38,919	38,380

4.4.3 Comparaison des temps de calcul de chaque méthode d'analyse modale

Pour terminer cette série de tests préliminaires, le temps de post-traitement pour chaque méthode d'analyse modale est étudié. Pour cela, les données d'accélération de la section précédente sont réutilisées et le post-traitement est effectué par ordinateur avec les algorithmes Matlab, par ordinateur avec les algorithmes Java et par téléphone intelligent avec l'application Android. À noter que l'ordinateur est un Lenovo Thinkpad X1 Carbon et le téléphone est un LG G4. Cette fois-ci, les trois méthodes d'analyse modale sont étudiées.

Les résultats sont inscrits dans le tableau 4.5. Il est observé que le post-traitement est très rapide par ordinateur : quelle que soit la méthode d'analyse modale (PP, SSI-COV ou FDD) et quel que soit le langage (Matlab ou Java), le temps de calcul est toujours inférieur à 10 s. En revanche, les temps de post-traitement varient beaucoup au sein de l'application. Il faut environ 7 secondes pour le PP, plus de 4 minutes pour la FDD et près de 50 min pour la méthode SSI-COV. Cela confirme qu'il faut absolument privilégier la première méthode. Par ailleurs, la FDD peut également être utilisée pour fin de comparaison, d'autant plus si le téléphone intelligent choisi est plus performant que le LG G4. Cependant, la méthode SSI-

Tableau 4.5 Comparaison des temps de calcul de chaque méthode d'analyse modale

Numéro de l'essai	Méthode de post-traitement	Temps (s)		
		PP	SSI-COV	FDD
Hauban 1	Matlab	0,327	1,445	3,849
	Java	0,338	10,139	8,965
	Android	6,902	2954,6	241,524
Hauban 2	Matlab	0,377	2,137	4,157
	Java	0,383	7,244	5,262
	Android	6,73	N.D. ¹	260,100
Hauban 3 Essai 1	Matlab	0,356	1,450	3,906
	Java	0,328	7,315	5,621
	Android	7,331	N.D. ¹	250,167
Hauban 3 Essai 2	Matlab	0,333	1,488	3,741
	Java	0,298	7,17	5,561
	Android	7,245	N.D. ¹	242,172
Hauban 4 Essai 1	Matlab	0,288	1,392	3,880
	Java	0,336	7,097	6,497
	Android	8,164	N.D. ¹	262,607
Hauban 4 Essai 2	Matlab	0,226	0,844	4,094
	Java	0,356	6,538	4,829
	Android	7,973	N.D. ¹	264,192

¹ N.D. : Non Disponible

COV doit définitivement être abandonnée. Celle-ci ne peut être utilisée que si les données sont exportées sur ordinateur.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l'application pour téléphone intelligent permettant de mesurer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission a été présentée. Cette application est la production principale de cette maîtrise. Elle permet de mettre en œuvre la technique développée dans le chapitre précédent. Programmée en Java à l'aide des environnements Eclipse et Android Studio, elle se veut simple d'utilisation. Des améliorations pourront lui être apportées, notamment concernant le design de l'interface ou l'utilisation du GPS. Par ailleurs, les tests préliminaires de la section 4.4 montrent que l'application est prête à l'emploi. Afin de vérifier son bon fonctionnement et de proposer une procédure de mise en œuvre, il faut maintenant effectuer une campagne d'essais in situ.

CHAPITRE 5 APPLICATION DE LA NOUVELLE TECHNIQUE À L'AIDE D'ESSAIS IN SITU SUR UN SUPPORT HAUBANÉ D'UNE LIGNE 735KV

5.1 Objectifs et méthodologie

Afin d'appliquer la nouvelle technique permettant de mesurer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission mise au point au chapitre 3 et l'application présentée au chapitre 4, une campagne d'essais en conditions réelles est conduite. Pour cela, le pylône de Terrebonne (Québec, Canada) présenté à la section 3.2.2 est à nouveau choisi. À titre de rappel, il s'agit d'un pylône en V soutenu de part et d'autre par quatre haubans. Les caractéristiques des haubans sont indiquées dans le tableau 5.1. La campagne d'essais se fait en trois temps. Tout d'abord, la tension mécanique de chaque hauban est mesurée à l'aide d'un dynamomètre. Les valeurs relevées serviront de valeurs de référence pour la suite des essais. Ensuite, la nouvelle technique est mise en œuvre en essayant différentes combinaisons de téléphone intelligent, position d'attache, direction de déplacement du câble et méthode d'analyse modale. Enfin, la méthode du retour d'onde est appliquée à chaque hauban.

Tableau 5.1 Caractéristiques des haubans du pylône de Terrebonne

Paramètre	Hauban 1	Hauban 2	Hauban 3	Hauban 4
Longueur du câble (m)	55,45	52,58	53,24	54,56
Longueur de l'ancrage (m)	1,10	1,35	1,40	1,46
Diamètre (mm)	26,99	26,99	26,99	26,99
Masse linéique (kg/m)	3,429	3,429	3,429	3,429
Inclinaison (°)	56	56	56	56

L'objectif des essais in situ est double. D'une part, il s'agit de tester la nouvelle technique et l'application pour téléphone intelligent. D'autre part, il convient de proposer une procédure de mise en œuvre adaptée. Les sections 5.3 et 5.4 répondent chacune à un des deux objectifs. Avant cela, la campagne d'essais est présentée dans la section 5.2.

5.2 Présentation des essais in situ

Cette section présente le choix du matériel nécessaire pour les essais, la proposition initiale de procédure de mise en œuvre de la nouvelle technique et la liste des essais réalisés.

5.2.1 Choix du matériel

Pour réaliser la campagne d’essais in situ, le matériel nécessaire se limite à un dynamomètre, un téléphone intelligent et un dispositif permettant de fixer le cellulaire sur le hauban.

Les caractéristiques des téléphones intelligents qui nous intéressent sont listées dans la revue de littérature (section 2.2.2). À titre de rappel, il est essentiel d’avoir un accéléromètre et un processeur performants, suffisamment d’espace de stockage et une bonne résistance aux conditions extrêmes. L’étude comparative réalisée par Morgenthal [11] évoquée dans la revue de littérature montre que les accéléromètres des téléphones intelligents modernes sont suffisamment performants pour mesurer la tension mécanique dans les haubans. La différence se fait principalement sur l’autonomie et la durabilité du cellulaire et sur la fiabilité de la marque. Deux téléphones intelligents sont choisis : le Motorola Moto G7 et le Samsung Galaxy A50. Le premier a l’avantage de l’autonomie et de la résistance. Par ailleurs, il fonctionne sous Android Stock, ce qui est recommandé dans notre cas afin d’avoir accès à 100 % des capacités du cellulaire. Le second se distingue par ses bonnes performances et par la fiabilité et la disponibilité de la marque Samsung. Les spécifications du Motorola Moto G7 et du Samsung Galaxy A50 sont indiquées dans le tableau 5.2. Les essais permettront de déterminer quel téléphone privilégier.

Tableau 5.2 Spécifications du Motorola Moto G7 et du Samsung Galaxy A50

	Motorola Moto G7	Samsung Galaxy A50
Date de lancement	mars 2019	mars 2019
Dimensions	157,0 x 75,3 x 8,0 mm	158,5 x 74,7 x 7,7 mm
Taille de l’écran	6,2 pouces	6,4 pouces
Poids	172 g	166 g
Système d’exploitation	Android 9.0	Android 9.0
CPU	1,8 GHz	2,3 + 1,7 GHz
Mémoire interne	64GB	64GB
RAM	4 GB	4 GB

Pour fixer le téléphone intelligent sur le hauban, un dispositif d’attache est conçu. Il s’agit d’un boîtier en plastique coulissant pouvant contenir des cellulaires de différentes dimensions. Deux encoches à l’arrière du boîtier permettent de faire passer des bagues à serrer autour du câble (voir figure 5.1). Le boîtier a été développé et imprimé par Marc Vanderweyen.

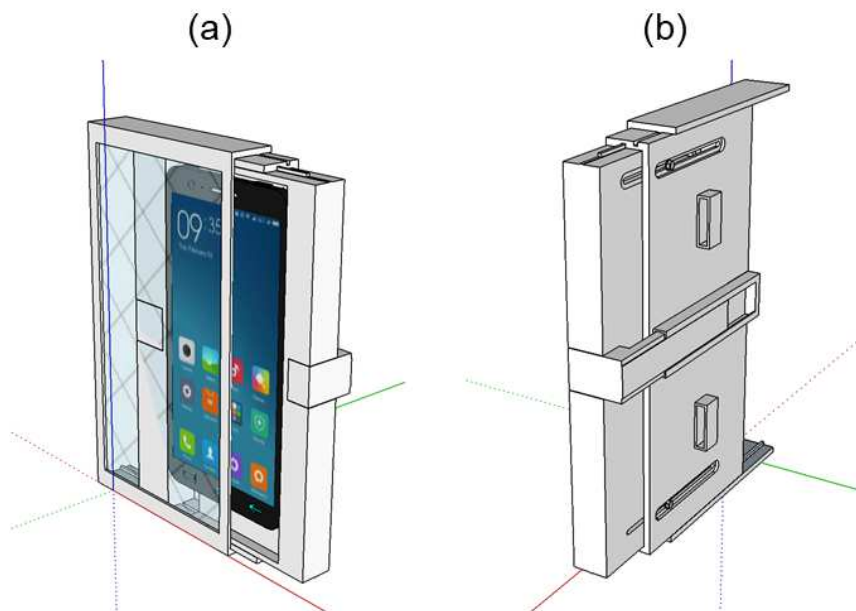


Figure 5.1 Schémas du dispositif d'attache : (a) Vue de devant ; (b) Vue de derrière - Dessins Marc Vanderweyen

5.2.2 Proposition initiale de procédure

La nouvelle technique est implémentée dans l'application pour téléphone intelligent présentée au chapitre précédent. Afin de clarifier son utilisation, une procédure de mise en œuvre est proposée. Celle-ci comporte cinq étapes :

1. Choisir et valider les paramètres généraux et avancés dans l'application ;
2. Placer le téléphone dans son boîtier et le fixer sur le hauban ;
3. Appuyer sur le bouton COMMENCER ;
4. Faire vibrer le hauban "à la main" ;
5. Attendre la fin de l'acquisition (60 s) et du post-traitement puis relever la valeur de la tension mécanique affichée à l'écran.

Les cinq étapes sont illustrées à la figure 5.2. Il est important de noter que lorsque l'option de déclenchement automatique n'est pas choisie, il faut inverser les étapes 3 et 4.



Figure 5.2 Étapes de la procédure de mise en œuvre de la nouvelle technique

Pour compléter la procédure, certains paramètres doivent être choisis. Il s'agit du type de téléphone intelligent, de la position d'attache et de la direction dans laquelle le câble est déplacé. Un des objectifs de la campagne d'essais est donc de retenir une valeur pour chaque paramètre manquant.

5.2.3 Liste des essais in situ

Lors de la campagne d'essais, la tension mécanique des haubans 1 à 4 est mesurée de trois manières différentes : avec un dynamomètre, avec la méthode du retour d'onde et avec la nouvelle technique. La mesure à l'aide du dynamomètre doit précéder l'utilisation des deux autres méthodes car elle peut entraîner un léger retensionnement du câble. Elle est effectuée une fois par hauban. Au contraire, la méthode du retour d'onde est implémentée trois fois par hauban et la nouvelle technique est mise en œuvre de nombreuses fois. Plus précisément, deux types de téléphone intelligent (Motorola Moto G7 et Samsung Galaxy A50), deux positions d'attache (à 0,5 m et 1,0 m du culot) et deux directions de déplacement du câble (\vec{n}^1 et \vec{e}_x^2) sont testés pour chaque hauban. Ainsi, une mesure pour chaque combinaison de paramètres est effectuée pour chaque hauban. À noter qu'une troisième position d'attache (à 1,5 m du culot) est testée pour le hauban 1 seulement et que chaque essai est réalisé deux fois dans le cas du Motorola Moto G7. À noter également que dans tous les cas, deux méthodes d'analyse modale sont utilisées : la méthode PP qui est celle choisie dans le chapitre 3 et la méthode FDD pour fins de comparaison.

-
1. Direction normale au câble et dans le plan du câble.
 2. Direction horizontale orthogonale au plan du câble

La liste complète des essais in situ est disponible à l'annexe D. Le nombre total d'essais effectués est de 4 pour le dynamomètre, 12 pour la méthode du retour d'onde et 120 pour la nouvelle technique.

5.3 Application de la nouvelle technique

Dans cette section, les résultats bruts de l'annexe D sont analysés afin de répondre au premier objectif défini à la section 5.1 : tester la nouvelle technique et l'application pour téléphone intelligent. Afin d'évaluer les performances de la nouvelle technique, il faut étudier sa fiabilité et sa précision. À titre de rappel, une méthode est d'autant plus fiable que ses résultats sont concentrés autour d'une valeur et une méthode est d'autant plus précise que le biais, c'est-à-dire l'écart entre la valeur moyenne de ses résultats et la valeur cible, est faible.

5.3.1 Approche qualitative

La figure 5.3 présente les résultats des tensions mécaniques mesurées par la nouvelle technique pour chaque hauban. Les nuages de points représentent différents essais de vibration et les lignes rouges illustrent les valeurs données par le dynamomètre.

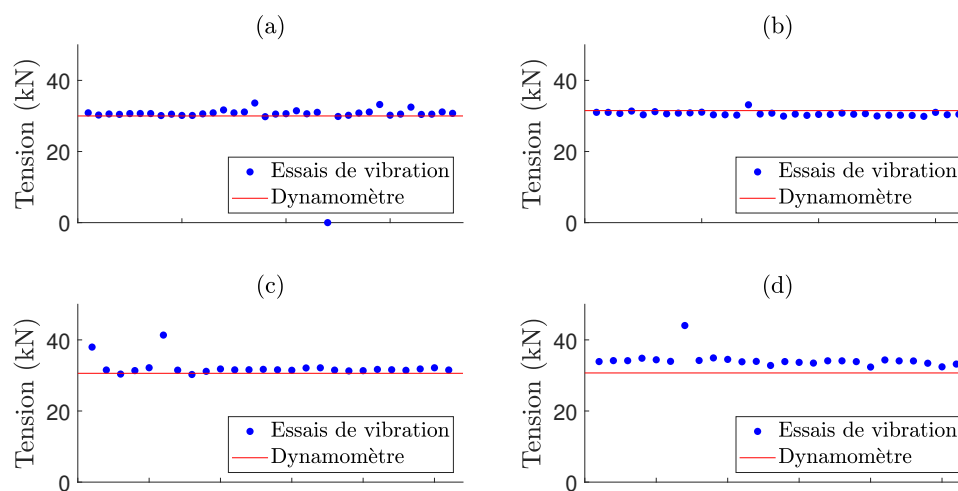


Figure 5.3 Tensions mécaniques mesurées par la nouvelle technique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4

À première vue, les nuages de points sont bien resserrés autour d'une certaine tension. Cependant, quelques exceptions sont visibles : certaines mesures fournissent des tensions nulles ou

supérieures à 40 kN. Une explication plausible à ces exceptions est une mauvaise fixation du téléphone dans le boîtier. Ceci crée des vibrations supplémentaires qui faussent les résultats. La figure 5.4 montre les spectres de Fourier d’une mesure “normale” (5.4a) et d’une exception (5.4b). Le deuxième spectre comporte plus de bruit, ce qui appuie la thèse d’une vibration parasite. Une autre explication possible est un mauvais traitement des données d’accélération par les algorithmes de post-traitement. En particulier, les algorithmes n’arrivent pas toujours à gérer le cas particulier pour lequel des pics non consécutifs sont sélectionnés. La figure 5.5 illustre cette théorie.

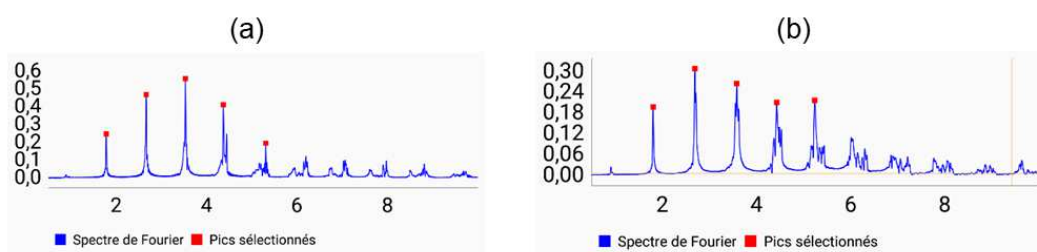


Figure 5.4 Captures d’écran du Samsung Galaxy A50 : (a) Spectre de Fourier classique ; (b) Spectre de Fourier comportant du bruit

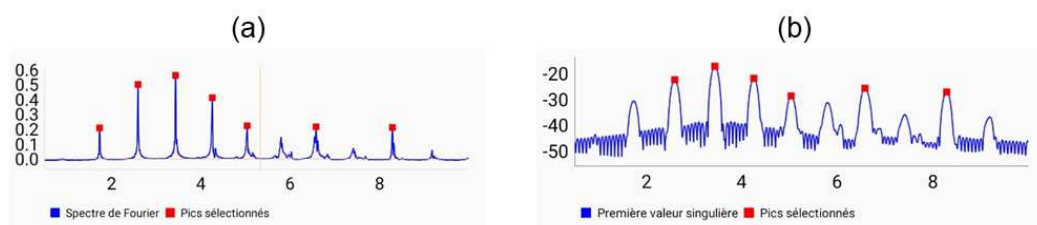


Figure 5.5 Captures d’écran du Motorola Moto G7 : (a) Sélection de pics non consécutifs pour la méthode PP ; (b) Sélection de pics non consécutifs pour la méthode FDD

Par ailleurs, les nuages de points sont proches des valeurs données par le dynamomètre à l’exception du hauban 4. Pour ce dernier, deux explications sont envisageables. Soit la valeur mesurée par le dynamomètre est erronée, soit un paramètre d’entrée général (longueur du câble, longueur de l’ancrage, masse linéique) est incorrect. Comme les paramètres d’entrée généraux n’interviennent que dans la formule de la corde vibrante, le biais créé par une telle erreur serait bien le même pour chaque mesure (et donc pour chaque point du nuage de points).

5.3.2 Approche quantitative

D'un point de vue statistique, la fiabilité est mesurée grâce au coefficient de variation et la précision est mesurée grâce à l'écart relatif à la moyenne. En notant μ la moyenne du nuage de points, σ son écart type et \hat{T} la valeur donnée par le dynamomètre, le coefficient de variation δ_{cv} et l'écart relatif à la moyenne Δ_{rel} sont définis par :

$$\delta_{cv} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5.1)$$

$$\Delta_{rel} = \frac{\mu - \hat{T}}{\hat{T}} \quad (5.2)$$

Le tableau 5.3 contient les valeurs de δ_{cv} et de Δ_{rel} pour les nuages de points de la figure 5.3. À noter que les exceptions ont été enlevées pour calculer les valeurs du tableau.

Tableau 5.3 Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.3

Hauban	δ_{cv}	Δ_{rel}
1	2,7 %	2,8 %
2	1,9 %	-2,8 %
3	1,5 %	3,0 %
4	1,9 %	10,3 %

Les résultats sont satisfaisants à l'exception de l'écart relatif à la moyenne pour le hauban 4. Les explications envisageables ont été données à la section précédente.

5.3.3 Comparaison avec la méthode du retour d'onde

Afin de les comparer avec les résultats de la nouvelle technique, les valeurs des tensions mécaniques mesurées par la méthode du retour d'onde sont affichées à la figure 5.6. Les valeurs des coefficients de variation et des écarts relatifs des nuages de points sont données dans le tableau 5.4. À noter que chaque nuage de points ne contient que trois mesures.

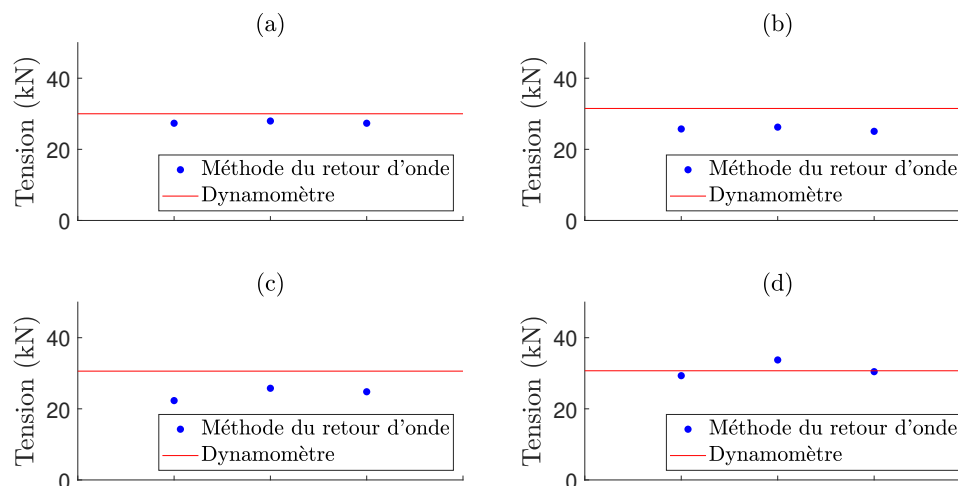


Figure 5.6 Tensions mécaniques mesurées par la méthode du retour d'onde : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4

Tableau 5.4 Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.6

Hauban	δ_{cv}	Δ_{rel}
1	1,3 %	-8,2 %
2	2,3 %	-18,5 %
3	7,4 %	-20,6 %
4	7,4 %	1,5 %

La méthode du retour d'onde est nettement moins fiable et moins précise que la nouvelle technique. De plus, à l'exception du hauban 4, les valeurs données par la méthode du retour d'onde sont systématiquement inférieures à celles obtenues avec le dynamomètre. Ceci est un argument supplémentaire en faveur de la théorie selon laquelle la valeur donnée par le dynamomètre est erronée dans le cas du hauban 4.

5.3.4 Conclusions préliminaires

Les résultats des essais in situ sont très encourageants. La technique développée semble être à la fois fiable et précise. Toutefois, des exceptions sont à noter. Même si celles-ci sont très rares (seulement 4 mesures sur 120), il faut en tenir compte. Pour cela, deux approches sont envisagées. La première consiste à traiter le problème à la racine en améliorant le moyen de fixation du téléphone intelligent sur le hauban et en modifiant les algorithmes de manière à mieux traiter les cas où des pics non consécutifs sont sélectionnés. La seconde consiste à

proposer une procédure diminuant les erreurs, par exemple en refaisant chaque mesure trois fois.

Par ailleurs, il faut noter que les résultats obtenus ne sont pas suffisants pour valider complètement l'application mobile. Ceux-ci devront être complétés par des essais en laboratoire approfondis permettant de vérifier le fonctionnement de la nouvelle technique sur différents types de câbles et différentes tensions mécaniques. L'avantage des essais en laboratoire est qu'il est possible d'installer une cellule de charge afin de mesurer la tension mécanique dans le câble en continu de manière très précise.

5.4 Procédure de mise en œuvre de la nouvelle technique

En plus d'appliquer la nouvelle technique, l'objectif des essais in situ est de proposer une procédure de mise en œuvre. Une proposition initiale a été émise dans la section 5.2.2. Afin de la compléter, il faut choisir le téléphone intelligent, la position d'attache et la direction de déplacement du câble. Une confirmation du choix de la méthode d'analyse modale est également judicieux.

5.4.1 Choix du téléphone intelligent

Afin de choisir le téléphone intelligent, la figure 5.3 présentant les résultats des tensions mécaniques mesurées par la nouvelle technique pour chaque hauban est réordonnée. Chaque nuage de points est divisé en deux ensembles distinguant les essais effectués avec le Motorola Moto G7 de ceux réalisés avec le Samsung Galaxy A50. Les points ayant la même abscisse correspondent à des essais ayant les mêmes paramètres à l'exception du cellulaire. Le tableau 5.5 et la figure 5.7 présentent respectivement les valeurs de δ_{cv} et Δ_{rel} et les graphes pour chaque nuage de points.

Tableau 5.5 Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.7

Hauban	Motorola Moto G7		Samsung Galaxy A50	
	δ_{cv}	Δ_{rel}	δ_{cv}	Δ_{rel}
1	3,6 %	4,0 %	0,8 %	1,6 %
2	1,0 %	-3,6 %	2,2 %	-1,9 %
3	1,0 %	3,5 %	2,1 %	2,2 %
4	2,0 %	9,6 %	1,1 %	11,9 %

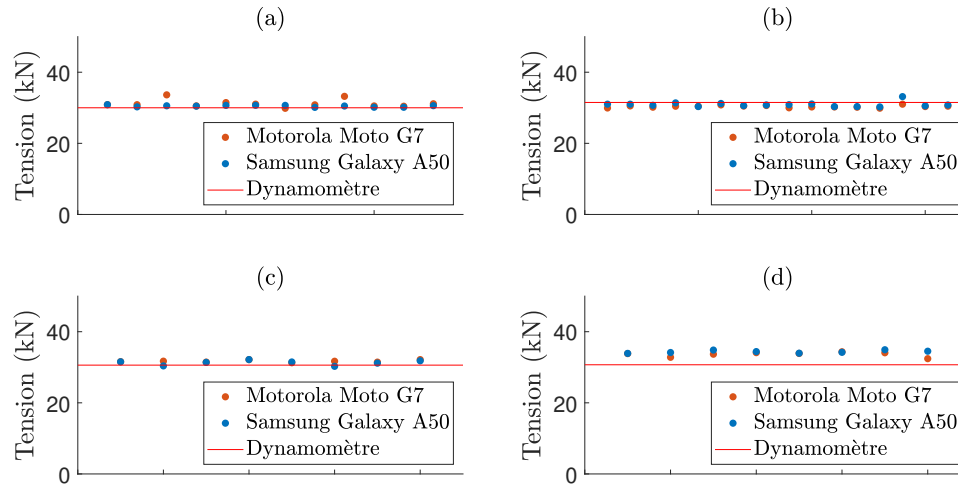


Figure 5.7 Influence du type de téléphone intelligent sur la tension mécanique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4

Les deux téléphones ont la même fiabilité et le Samsung est légèrement plus précis. Cependant, le Motorola a tout de même une précision acceptable. De plus, il est plus robuste et possède une meilleure autonomie. Ainsi, les deux téléphones peuvent être choisis.

5.4.2 Choix de la position d'attache

Afin de choisir la position de fixation du téléphone intelligent sur le hauban, la figure 5.3 est réordonnée à nouveau. Chaque nuage de points est divisé en deux ensembles distinguant les essais effectués en plaçant le cellulaire à 0,5 m du culot de ceux réalisés en le plaçant à 1,0 m. Les points ayant la même abscisse correspondent à des essais ayant les mêmes paramètres à l'exception de la position d'attache. Le tableau 5.6 et la figure 5.8 présentent respectivement les valeurs de δ_{cv} et Δ_{rel} et les graphes pour chaque nuage de points.

Tableau 5.6 Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.8

Hauban	0,5 m		1,0 m	
	δ_{cv}	Δ_{rel}	δ_{cv}	Δ_{rel}
1	1,7 %	2,2 %	4,3 %	3,6 %
2	1,4 %	-3,1 %	2,3 %	-2,4 %
3	1,6 %	2,4 %	1,1 %	3,7 %
4	1,7 %	10,0 %	2,1 %	10,5 %

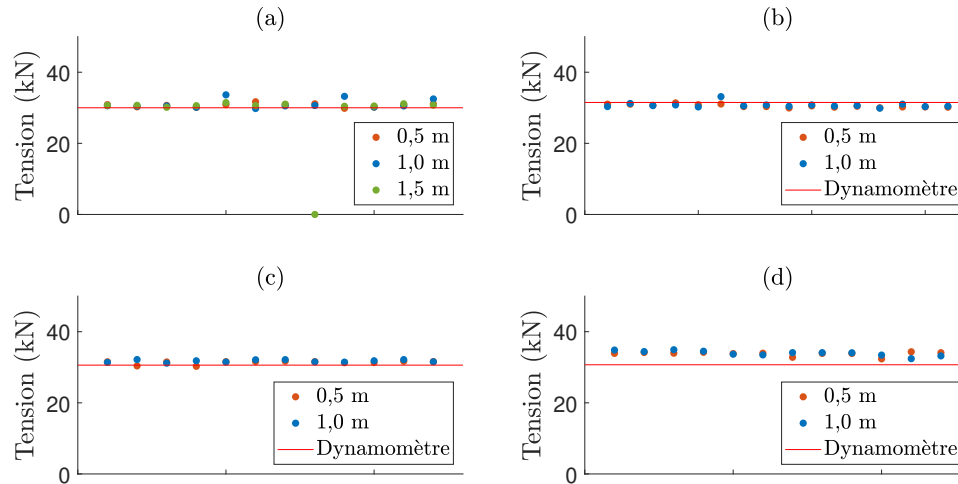


Figure 5.8 Influence de la position du téléphone intelligent sur la tension mécanique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4

Les résultats sont plus fiables et plus précis lorsque le téléphone est positionné à 0,5 m du culot. Cette position est donc privilégiée. Cependant, les résultats sont tout de même acceptables lorsque le téléphone est situé à 1,0 m du culot.

5.4.3 Choix de la direction de déplacement du câble

Afin de choisir la direction dans laquelle le câble est tiré, la figure 5.3 est réordonnée encore une fois. Chaque nuage de points est divisé en deux ensembles distinguant les essais effectués en tirant le câble selon la direction \vec{n} de ceux réalisés en tirant selon la direction \vec{e}_x . Les points ayant la même abscisse correspondent à des essais ayant les mêmes paramètres à l'exception de la direction de déplacement du câble. Le tableau 5.7 et la figure 5.9 présentent respectivement les valeurs de δ_{cv} et Δ_{rel} et les graphes pour chaque nuage de points.

Tableau 5.7 Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.9

Hauban	Direction \vec{n}		Direction \vec{e}_x	
	δ_{cv}	Δ_{rel}	δ_{cv}	Δ_{rel}
1	3,5 %	3,0 %	1,8 %	2,6 %
2	2,5 %	-2,4 %	1,0 %	-3,1 %
3	0,8 %	3,0 %	2,0 %	3,1 %
4	1,9 %	10,3 %	2,0 %	10,3 %

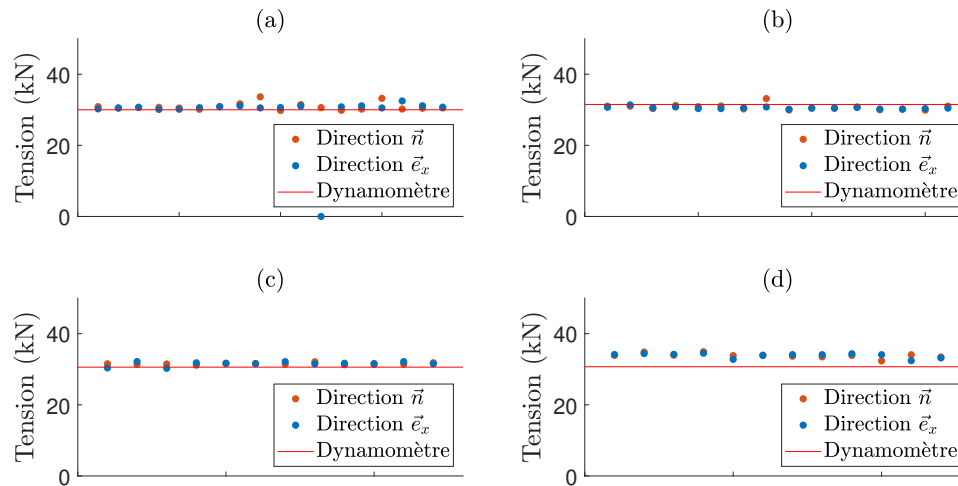


Figure 5.9 Influence de la direction de déplacement du câble sur la tension mécanique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4

Les résultats sont légèrement plus fiables lorsque le câble est déplacé dans la direction \vec{e}_x . Cependant, comme les résultats sont également acceptables lorsque le câble est tiré dans la direction \vec{n} et qu'il est plus naturel pour un utilisateur de tirer dans cette direction, \vec{n} est privilégiée.

5.4.4 Choix de la méthode d'analyse modale

Afin de confirmer le choix de la méthode d'analyse modale, la figure 5.3 est réordonnée une dernière fois. Chaque nuage de points est divisé en deux ensembles distinguant les mesures post-traitées avec la méthode PP de celles post-traitées avec la méthode FDD. Le tableau 5.8 et la figure 5.10 présentent respectivement les valeurs de δ_{cv} et Δ_{rel} et les graphes pour chaque nuage de points.

Tableau 5.8 Coefficients de variation et écarts relatifs des nuages de points de la figure 5.10

Hauban	Méthode PP		Méthode FDD	
	δ_{cv}	Δ_{rel}	δ_{cv}	Δ_{rel}
1	2,7 %	3,1 %	2,8 %	2,5 %
2	1,2 %	-2,7 %	2,5 %	-2,9 %
3	1,5 %	3,2 %	1,5 %	2,8 %
4	1,5 %	10,5 %	2,3 %	10,0 %

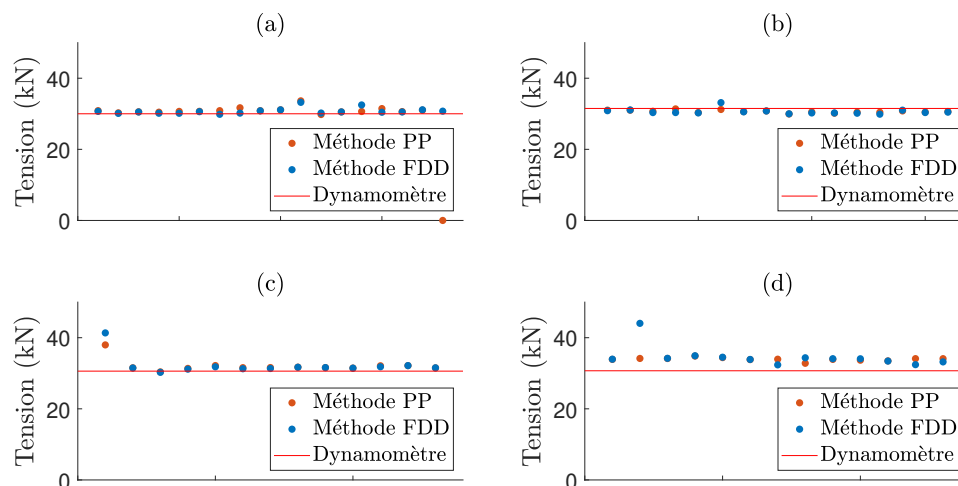


Figure 5.10 Influence de la méthode d’analyse modale sur la tension mécanique : (a) Hauban 1 ; (b) Hauban 2 ; (c) Hauban 3 ; (d) Hauban 4

Les résultats sont légèrement plus fiables lorsque la méthode PP est utilisée. De plus, étant donné qu’elle est moins coûteuse en temps de calcul et plus facile à calibrer, le choix de cette méthode est confirmé. Cependant, la méthode FDD donne des résultats qui sont également acceptables.

5.4.5 Proposition finale de procédure

En résumé, la nouvelle technique doit être mise en œuvre en plaçant le téléphone à 0,5 m du culot, en tirant sur le câble dans son plan selon la direction normale et en utilisant la méthode PP. Le choix du téléphone est laissé libre à l’utilisateur (Motorola Moto G7 ou Samsung Galaxy A50). Ainsi, la procédure proposée à la section 5.2.2 devient :

1. Choisir et valider les paramètres généraux et avancés dans l’application - **en particulier, sélectionner la méthode PP** ;
2. Placer le téléphone dans son boîtier et le fixer sur le hauban **à 0,5 m du culot** ;
3. Appuyer sur le bouton COMMENCER ;
4. Faire vibrer le hauban “à la main” **selon la direction \vec{n}** ;
5. Attendre la fin de l’acquisition (60 s) et du post-traitement puis relever la valeur de la tension mécanique affichée à l’écran.

Il est important de noter que les points évoqués ci-dessus sont des recommandations. La nou-

velle technique donne des résultats acceptables lorsque la position du téléphone, la direction de déplacement du câble et la méthode d'analyse modale sont modifiées. Enfin, il est conseillé d'effectuer chaque mesure trois fois et de vérifier les graphes affichés à l'écran. Si les résultats sont cohérents et si les pics sélectionnés sont consécutifs, la valeur de la tension mécanique est obtenue à la précision souhaitée avec un degré de confiance élevé.

5.5 Conclusion

La campagne d'essais in situ menée sur les quatre haubans du pylône de Terrebonne permet d'appliquer le travail effectué dans les chapitres 3 et 4. Hormis de rares exceptions, les résultats obtenus ont une fiabilité et une précision satisfaisantes. Par ailleurs, les essais permettent de proposer et d'optimiser la procédure de mise en œuvre de la nouvelle technique. Une telle optimisation sert à la fois à augmenter les performances de la technique et à limiter le risque lié aux exceptions.

Toutefois, l'application pour téléphone intelligent implémentant la nouvelle technique n'est pas encore prête pour une utilisation systématique lors des mesures de tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission d'Hydro-Québec. Avant cela, il convient de réaliser des essais complémentaires sur une large gamme de câbles et de tensions mécaniques.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Synthèse des travaux

Ce mémoire présente le développement et l'application in situ d'une nouvelle technique pour mesurer la tension mécanique dans les haubans des lignes de transmission d'Hydro-Québec.

La nouvelle technique est inspirée de la méthode de vibration appliquée à la mesure de la tension mécanique dans les haubans de ponts. Ainsi, une revue de littérature extensive est conduite afin de mieux saisir les enjeux de la méthode de vibration et comprendre comment l'adapter au cas qui nous intéresse. Deux axes de travail sont dégagés pour le développement de la nouvelle technique : choisir et implémenter une méthode d'analyse modale ; choisir et implémenter une formule pratique reliant les fréquences naturelles à la tension mécanique. Afin de trouver la meilleure méthode d'analyse modale et la meilleure formule pratique, un modèle éléments finis de câble est développé à l'aide d'ADINA. Ce modèle numérique dynamique permet de reproduire la méthode de vibration et la méthode du retour d'onde actuellement utilisée par Hydro-Québec. Il est implémenté afin de réaliser une étude de sensibilité fondée sur un câble horizontal et quatre haubans d'un pylône en V haubané présent à Terrebonne (Québec, Canada). L'analyse des résultats de l'étude montre qu'il faut privilégier la méthode de sélection des pics et la formule de la corde vibrante. De plus, l'étude prouve que la nouvelle technique est plus précise et plus fiable que la méthode du retour d'onde.

Après avoir développé la technique, il faut l'implémenter. Pour cela, une application pour téléphone intelligent est développée. Celle-ci permet d'automatiser l'enregistrement des données d'accélération et le post-traitement, c'est-à-dire la mise en pratique de la méthode d'analyse modale et de la formule simple. Ainsi, l'utilisateur n'a plus qu'à fixer le téléphone intelligent sur le hauban, le faire vibrer et lancer l'application. La valeur de la tension mécanique s'affiche à l'écran après quelques dizaines de secondes d'acquisition et de post-traitement. Par ailleurs, l'application mobile permet aussi d'accéder à l'historique des mesures réalisées, de consulter le mode d'emploi et d'obtenir des informations complémentaires utiles à la maintenance des haubans des lignes de transmission d'Hydro-Québec.

Enfin, le dernier axe de travail concerne l'application in situ de la nouvelle technique. Pour cela, une campagne d'essais in situ est réalisée : pour chacun des quatre haubans du pylône de

Terrebonne, la tension mécanique est mesurée à l'aide d'un dynamomètre, de la méthode du retour d'onde et de la nouvelle technique. Les résultats montrent que la précision et la fiabilité de la nouvelle technique sont généralement satisfaisantes, même si quelques exceptions sont à prendre en compte. Enfin, la campagne d'essais permet aussi de proposer et d'affiner une procédure de mise en œuvre de la nouvelle technique.

6.2 Recommandations

Au vu du travail présenté dans ce mémoire, il est conseillé d'utiliser la nouvelle technique plutôt que la méthode du retour d'onde lorsque toutes les étapes de validation auront été réalisées. En effet, la nouvelle technique est à la fois plus précise et plus fiable. Son principal avantage est qu'elle ne dépend pas de la sensibilité de l'utilisateur qui l'effectue.

Concernant son utilisation, les recommandations suivantes sont formulées :

- pour une utilisation simple et rapide, la méthode PP est privilégiée par rapport aux méthodes SSI-COV et FDD. En revanche, ce choix sera à reconsidérer s'il est décidé par exemple d'augmenter la précision en utilisant plusieurs téléphones ou accéléromètres enregistrant les vibrations en différents points du hauban de manière simultanée ;
- la formule de la corde vibrante est suffisamment précise dans le cas qui nous intéresse. Pour obtenir une précision encore plus grande, d'autres formules sont disponibles dans la littérature ;
- l'accéléromètre et le processeur des téléphones intelligents modernes sont suffisamment performants pour l'application mobile développée. Le choix du cellulaire se fait principalement sur l'espace mémoire, l'autonomie, la robustesse et la fiabilité de la marque ;
- il est préconisé de positionner le téléphone intelligent à 0,5 m du culot et d'induire une impulsion dans la direction normale au câble dans le plan câble. Cependant, les résultats restent satisfaisants lorsque le téléphone intelligent est positionné à 1,0 m du culot et/ou l'impulsion est induite dans la direction horizontale orthogonale au plan du câble ;
- afin de limiter les erreurs, l'utilisateur doit effectuer chaque mesure au moins trois fois et vérifier les graphes affichés à l'écran.

Enfin, il est important de souligner que la nouvelle technique et l'application qui l'implémente nécessitent des essais complémentaires en laboratoire et en conditions réelles. De plus, des améliorations supplémentaires peuvent être apportées à l'application mobile afin de la rendre

compatible avec une utilisation systématique lors de la maintenance des haubans des lignes de transmission d'Hydro-Québec.

6.3 Travaux futurs

Comme indiqué précédemment, la campagne d'essais in situ permet d'appliquer une première fois la nouvelle technique. Cependant, de nouveaux essais doivent être réalisés. Afin de pouvoir tester une large gamme de câbles, ces essais seront effectués en laboratoire. L'avantage est qu'il est possible de faire varier la tension mécanique, la longueur et l'inclinaison pour chaque câble. De plus, la tension mécanique peut être obtenue en continu à l'aide d'une cellule de charge préinstallée. Ce dispositif est plus précis que le dynamomètre.

Par ailleurs, le boîtier permettant de fixer le téléphone intelligent sur le hauban doit être amélioré. En l'état actuel, celui-ci est trop fragile et trop long à installer. En effet, les bagues permettant de l'accrocher doivent être serrées à l'aide d'un tournevis, ce qui n'est pas très pratique. Par ailleurs, il serait intéressant de fabriquer un boîtier qui serve comme isolant thermique afin d'éviter une perte de performances du téléphone intelligent en hiver.

D'autre part, les algorithmes de post-traitement peuvent être améliorés. Afin de gagner en précision, une étude plus poussée de la formule pratique permettant de relier la tension mécanique aux fréquences naturelles peut être réalisée. De plus, les algorithmes doivent être modifiés de manière à mieux tenir compte du cas où des pics non consécutifs sont sélectionnés.

Enfin, l'application pour téléphone intelligent doit être modifiée afin de répondre aux besoins de simplification et d'intégration. D'une part, l'interface de l'application doit être simplifiée afin de pouvoir être utilisée en conditions réelles. Cela signifie que les paramètres et les options à indiquer doivent être limités au strict minimum et que l'affichage doit inclure seulement la valeur finale de la tension. D'autre part, l'application mobile doit être modifiée de manière à être intégrée dans les procédures de gestion et de maintenance d'Hydro-Québec.

RÉFÉRENCES

- [1] [En ligne]. Disponible : <http://www.hydroquebec.com/>
- [2] N. Bouikni, “Analyses et recommandations d’ingénierie au sujet de l’efficacité des méthodes et outils utilisés pour la vérification de la tension mécanique des haubans des pylônes,” APE, HQ-TransÉnergie, Rapport technique, jan 2016.
- [3] PIAB Force Measurement, *PIAB RTM 20 D with microprocessor - Users Manual*, Åkersberga, Sweden.
- [4] A. Cunha et E. Caetano, “Dynamic measurements on stay cables of cable-stayed bridges using an interferometry laser system,” *Experimental Techniques*, vol. 23, p. 39–43, 1999.
- [5] H. Nassif, M. Gindy et J. Davis, “Comparison of laser doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration,” *NDT&E International*, vol. 38, p. 213–218, 2005.
- [6] D. Feng *et al.*, “Cable tension force estimate using novel noncontact vision-based sensor,” *Measurement*, vol. 99, p. 44–52, 2017.
- [7] X. Zhao, K. Ri et N. Wang, “Experimental verification for cable force estimation using handheld shooting of smartphones,” *Journal of Sensors*, vol. ID 5625396, p. 13 pages, 2017.
- [8] S. Chen et Q. Yan, “A method of measuring the cable tension force with the application of smart phones,” *Computer Modelling and New Technologies*, vol. 17, n°. 5D, p. 11–18, 2013.
- [9] Y. Yu *et al.*, “Initial validation of mobile-structural health monitoring method using smartphones,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, n°. 2, p. 274391, 2015.
- [10] X. Zhao *et al.*, “Portable and convenient cable force measurement using smartphone,” *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 5, p. 481–491, 2015.
- [11] G. Morgenthal *et al.*, “Determination of stay-cable forces using highly mobile vibration measurement devices,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 23, n°. 2, p. 04017136, 2017.
- [12] X. Zhao *et al.*, “Smartphone-based mobile testing technique for quick bridge cable-force measurement,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 22, n°. 4, p. 06016012, 2017.
- [13] P. Paultre, *Dynamique des structures : Application aux ouvrages de génie civil*, 2^e éd. P&P Éditions, Sherbrooke, QC, Canada, 2017.

- [14] E. Reynders, “System identification methods for (operational) modal analysis : Review and comparison,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 19, n^o. 1, p. 51–124, 2012.
- [15] J. Bendat et A. Piersol, *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*. Wiley, New York, NY, USA, 1980.
- [16] R. Brincker, L. Zhang et P. Andersen, “Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition,” *Smart Materials and Structures*, vol. 10, p. 441–445, 2001.
- [17] S. Ibrahim, “Random decrement technique for modal identification of structures,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 14, n^o. 11, p. 696–700, 1977.
- [18] S. Ibrahim et E. Mikulcik, “A method for the direct identification of vibration parameters from the free response,” *The Shock and Vibration Bulletin*, vol. 47, n^o. 4, p. 183–198, 1977.
- [19] J. Juang, *Applied System Identification*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1994.
- [20] P. Van Overschee et B. De Moor, “Stochastic identification,” dans *Identification for Linear Systems : Theory, Implementation, Applications*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996, p. 57–94.
- [21] Y. Chaouche et C. Azencott. (2018) Partitionnez vos données avec un algorithme de clustering hiérarchique. [En ligne]. Disponible : <https://openclassrooms.com/fr/courses/4379436-explorez-vos-donnees-avec-des-algorithmes-non-supervises/4379561-partitionnez-vos-donnees-avec-un-algorithme-de-clustering-hierarchique>
- [22] S. Haji Agha Mohammad Zarbaf, “Vibration-based cable tension estimation in cable-stayed bridges,” thèse de doctorat, University of Cincinnati, Cincinnati, OH, 2018.
- [23] B. Kim, N. Stubbs et T. Park, “A new method to extract modal parameters using output-only responses,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 282, p. 215–230, 2005.
- [24] G. Ricciardi et F. Saitta, “A continuous vibration analysis model for cables with sag and bending stiffness,” *Engineering Structures*, vol. 30, p. 1459–1472, 2008.
- [25] S. Debora *et al.*, “Evaluation of cable tension using vibration based methodologies for health monitoring of structures,” *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 4, n^o. 6, p. 506–514, mai 2015.
- [26] W. Ren, G. Chen et W. Hu, “Empirical formulas to estimate cable tension by cable fundamental frequency,” *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 20, n^o. 3, p. 363–380, 2005.

- [27] M. Ceballos et C. Prato, "Determination of the axial force on stay cables accounting for their bending stiffness and rotational end restraints by free vibration tests," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 317, p. 127–141, 2008.
- [28] H. Irvine, *Cable Structures*. The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1981.
- [29] H. Nam et N. Nghia, "Estimation of cable tension using measured natural frequencies," *Procedia Engineering*, vol. 14, p. 1510–1517, 2011.
- [30] A. Mehrabi et H. Tabatabai, "Unified finite difference formulation for free vibration of cables," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, n^o. 11, p. 1313–1322, nov 1998.
- [31] H. Zui, T. Shinke et Y. Namita, "Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method," *Journal of Structural Engineering*, vol. 122, n^o. 6, p. 651–656, juin 1996.
- [32] Z. Fang et J. Whang, "Practical formula for cable tension estimation by vibration method," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 17, n^o. 1, p. 161–164, 2012.
- [33] D. Dan, Y. Chen et X. Yan, "Determination of cable force based on the corrected numerical solution of cable vibration frequency equations," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 50, n^o. 1, p. 37–52, 2014.
- [34] N. Bouaanani et M. Ighouba, "A novel scheme for large deflection analysis of suspended cables made of linear or nonlinear elastic materials," *Advances in Engineering Software*, vol. 42, p. 1009–1019, 2011.
- [35] N. Bouaanani et P. Marcuzzi, "Finite difference thermoelastic analysis of suspended cables including extensibility and large sag effects," *Journal of Thermal Stresses*, vol. 34, p. 18–50, 2011.
- [36] B. Kim et T. Park, "Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 304, n^o. 3, p. 660–676, 2007.
- [37] ADINA R&D, "Adina 9.4," 2019. [En ligne]. Disponible : <http://www.adina.com/>
- [38] D. Saxon et A. Cahn, "Modes of vibration of a suspended chain," *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, vol. 6, n^o. 3, p. 273–285, 1953.
- [39] H. Irvine et T. Caughey, "The linear theory of free vibrations of a suspended cable," *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 341, p. 299–315, 1974.
- [40] M. Triantafyllou, "The dynamics of taut inclined cables," *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, vol. 37, n^o. 3, p. 421–440, 1984.
- [41] A. Davenport et G. Steels, "Dynamic behavior of massive guy cables," *Journal of the Structural Division*, vol. 91, n^o. 2, p. 43–70, 1965.

- [42] J. Russell et T. Lardner, “Experimental determination of frequencies and tension for elastoc cables,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, n°. 10, p. 1067–1072, 1998.
- [43] M. Gu et X. Du, “Experimental investigation of rain–wind-induced vibration of cables in cable-stayed bridges and its mitigation,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 93, n°. 1, p. 79–95, 2005.
- [44] N. Bouaanani, “Comportement statique des câbles,” dans *CIV2500 : Comportement des résistances et des constructions*. Polytechnique Montréal, 2011.
- [45] J. Goulet, “Regression,” dans *Probabilistic Machine Learning for Civil Engineers*. Polytechnique Montréal, 2018, p. 129–157.
- [46] M. Pastor, M. Binda et T. Harčarik, “Modal assurance criterion,” *Procedia Engineering*, vol. 48, p. 543–548, 2012.
- [47] Open Handset Alliance, “Android 9.0,” 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.android.com/>
- [48] Oracle, “JDK 12.0.1,” 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.oracle.com/>
- [49] Object Technology International, “Eclipse 4.11,” 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.eclipse.org/>
- [50] Google, “Android studio 3.4.2,” 2019. [En ligne]. Disponible : <https://developer.android.com/studio/>
- [51] Vieyra Software, “Physics toolbox sensor suite,” 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.vieyrasoftware.net/>

ANNEXE A TEXTE DE LA PAGE “MODE D’EMPLOI” DE L’APPLICATION POUR TÉLÉPHONE INTELLIGENT

EFFECTUER UNE MESURE

Pour effectuer une mesure, les étapes suivantes sont requises :

1. Dans le menu principal, appuyer sur “Commencer une mesure”.
2. Dans la page de choix des paramètres, entrer chaque paramètre et appuyer sur le bouton VALIDER. Pour modifier certains paramètres, appuyer sur le bouton RETOUR.
3. Placer le téléphone intelligent dans son boîtier et fixer le boîtier sur le hauban.
4. Si l’option de déclenchement automatique est choisie, appuyer sur le bouton COMMENCER puis faire vibrer le hauban. Dans le cas contraire, faire vibrer le hauban puis appuyer sur le bouton COMMENCER.
5. À la fin du compte à rebours et du post-traitement, lire les résultats affichés à l’écran.

Les résultats disponibles sont les suivants :

- les courbes de l’accélération selon les trois axes.
- pour la méthode de sélection des pics : la fréquence fondamentale f_0 , la tension mécanique T , le temps de calcul t et le spectre de Fourier de l’accélération.
- pour la méthode SSI-COV : la fréquence fondamentale f_0 , la tension mécanique T , le temps de calcul t et l’histogramme des fréquences naturelles.
- pour la méthode FDD : la fréquence fondamentale f_0 , la tension mécanique T , le temps de calcul t et la courbe de la première valeur singulière.

CONSULTER L’HISTORIQUE DES MESURES

Pour consulter l’historique, appuyer sur “Historique des mesures” dans le menu principal.

Une liste de mesures s’affiche :

- Les mesures disponibles sont identifiées par la date et l’heure auxquelles elles ont été effectuées.
- Pour afficher les résultats d’une mesure, il faut la sélectionner puis appuyer sur AFFICHER.

- Pour supprimer une ou plusieurs mesures, il faut les sélectionner puis appuyer sur SUPPRIMER.

Les résultats disponibles pour chaque mesure sont les suivants :

- la date et l'heure auxquelles elle a été effectuée.
- les paramètres généraux : la longueur du câble L_c , la longueur de l'ancrage L_a , la masse linéique du câble m_c .
- les courbes de l'accélération selon les trois axes.
- pour la méthode de sélection des pics : la fréquence fondamentale f_0 , la tension mécanique T , le temps de calcul t et le spectre de Fourier de l'accélération.
- pour la méthode SSI-COV : la fréquence fondamentale f_0 , la tension mécanique T , le temps de calcul t et l'histogramme des fréquences naturelles.
- pour la méthode FDD : la fréquence fondamentale f_0 , la tension mécanique T , le temps de calcul t et la courbe de la première valeur singulière.

SIGNIFICATION DES PARAMÈTRES

Tableau A.1 Paramètres généraux et avancés à renseigner pour chaque simulation - partie 1

Catégorie	Nom	Unité	Description du paramètre
Paramètres généraux	Longueur du câble	m	Distance entre les attaches supérieure et inférieure.
	Longueur de l'ancrage	m	Distance entre le sol et l'extrémité inférieure du câble.
	Masse linéique	kg/m	Masse linéique du câble.
	Analyse modale	-	Méthode d'analyse modale permettant d'obtenir les fréquences naturelles à partir des données d'accélération. Trois méthodes sont disponibles : PP, SSI-COV et FDD.
	Déclenchement auto	-	Dans le cas d'un déclenchement automatique, la simulation démarre automatiquement après la première vibration. Dans le cas contraire, la simulation démarre dès que le bouton START est enfoncé.
	Sauvegarde externe	-	Dans le cas d'une sauvegarde externe, les données d'accélération sont enregistrées au format CSV sur la mémoire externe du téléphone.
Paramètres avancés	Temps d'acquisition	s	Durée pendant laquelle le téléphone enregistre l'accélération mesurée par l'accéléromètre.
	Retard	s	Dans le cas d'un déclenchement automatique, le temps de retard correspond au décalage entre le moment où la première vibration est détectée et le début de l'enregistrement.
	Accélération limite	m/s ²	Dans le cas d'un déclenchement automatique, l'accélération limite correspond à l'accélération minimale que le téléphone doit détecter pour lancer l'enregistrement.

Tableau A.2 Paramètres généraux et avancés à renseigner pour chaque simulation - partie 2

Catégorie	Nom	Unité	Description du paramètre
Paramètres avancés	(M1) Fréquence max	Hz	Fréquence maximale du spectre de Fourier. Il s'agit d'une constante de l'algorithme de sélection des pics.
	(M1) Fréquence min	Hz	Fréquence minimale entre deux pics sur le spectre de Fourier. Il s'agit d'une constante de l'algorithme de sélection des pics.
	(M1) Puissance	-	Puissance de 2 donnant la taille de l'échantillon d'accélération sur lequel on applique une transformée de Fourier. Il s'agit d'une constante de l'algorithme de sélection des pics.
	(M1) Critère c	-	Critère d'amplitude. Il s'agit d'une constante de l'algorithme de sélection des pics.
	(M2) Fréquence max	Hz	Fréquence maximale du diagramme de stabilisation. Il s'agit d'une constante de l'algorithme SSI-COV.
	(M2) Ordre	-	Ordre de la méthode. Il s'agit d'une constante de l'algorithme SSI-COV.
	(M2) Résolution	Hz	Distance minimale entre deux agrégats de fréquences. Il s'agit d'une constante de l'algorithme SSI-COV.
	(M2) Erreur max 1	-	Critère de stabilisation sur les fréquences. Il s'agit d'une constante de l'algorithme SSI-COV.
	(M2) Erreur max 2	-	Critère de stabilisation sur les amortissements. Il s'agit d'une constante de l'algorithme SSI-COV.
	(M3) Fréquence max	Hz	Fréquence maximale du graphe des valeurs singulières. Il s'agit d'une constante de l'algorithme FDD.
	(M3) Puissance	-	Puissance de 2 donnant la taille de l'échantillon des valeurs singulières sur lequel on applique une transformée de Fourier. Il s'agit d'une constante de l'algorithme FDD.
	(M3) Critère c	-	Critère d'amplitude. Il s'agit d'une constante de l'algorithme FDD.

ANNEXE B TEXTE DE LA PAGE “À PROPOS” DE L’APPLICATION POUR TÉLÉPHONE INTELLIGENT

Cette application a été développée dans le cadre d’un projet de recherche en collaboration entre Polytechnique Montréal et Hydro-Québec, financé par une subvention de recherche et développement coopérative du CRSNG.

Cette version de l’application (v. 1.0 - 2019/08/14) a été programmée par Gauthier Magnaval, étudiant à la maîtrise recherche, et Najib Bouaanani, Professeur au Groupe de Recherche en Génie des Structures du Département des Génies Civil, Géologique et des Mines de Polytechnique Montréal.

Cette application est fournie telle quelle, sans aucune garantie, de quelque nature que ce soit, tant expresse qu’implicite. Les auteurs de cette application ne sauraient et ce, sous aucune circonstance, être tenus pour responsables de tous dommages directs, indirects ou accidentels issus de l’utilisation de l’application. Le risque lié à l’utilisation de l’application et à la qualité des résultats est la responsabilité entière de l’utilisateur.

ANNEXE C PHOTOGRAPHIES DES ESSAIS IN SITU



Figure C.1 Pylône en V haubané - Photographie Najib Bouaanani



Figure C.2 Méthode du retour d'onde - Photographie Najib Bouaanani



Figure C.3 Installation du dynamomètre - Photographie Najib Bouaanani



Figure C.4 Affichage du dynamomètre - Photographie Najib Bouaanani



Figure C.5 Fixation du téléphone intelligent sur le hauban - Photographie Najib Bouaanani



Figure C.6 Lecture des résultats de la nouvelle technique - Photographie Najib Bouaanani



Figure C.7 Affichage de l'accélération sur le téléphone intelligent - Photographie Najib Bouaanani



Figure C.8 Affichage des résultats sur le téléphone intelligent - Photographie Najib Bouaanani

ANNEXE D RÉSULTATS BRUTS DES ESSAIS IN SITU

Tableau D.1 Tensions mécaniques mesurées avec un dynamomètre

Numéro de l'essai	Hauban	Tension (kN)
1	1	30,0
2	2	31,5
3	3	30,6
4	4	30,7

Tableau D.2 Tensions mécaniques mesurées avec la méthode du retour d'onde

Numéro de l'essai	Hauban	Tension (kN)
1	1	27,338
2	1	27,964
3	1	27,338
4	2	25,728
5	2	26,244
6	2	25,063
7	3	22,312
8	3	25,780
9	3	24,801
10	4	29,322
11	4	33,743
12	4	30,447

Tableau D.3 Tensions mécaniques mesurées avec la nouvelle technique - partie 1

Essai	Hauban	Cellulaire	Position	Direction	Méthode	Tension (kN)
1	1	Motorola	0,5 m	\vec{n}	PP	30,875
2	1	Motorola	0,5 m	\vec{n}	PP	31,688
3	1	Motorola	0,5 m	\vec{n}	FDD	29,854
4	1	Motorola	0,5 m	\vec{n}	FDD	30,187
5	1	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	PP	30,868
6	1	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	PP	31,108
7	1	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	30,829
8	1	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	31,102
9	1	Motorola	1,0 m	\vec{n}	PP	33,635
10	1	Motorola	1,0 m	\vec{n}	PP	29,793
11	1	Motorola	1,0 m	\vec{n}	FDD	33,215
12	1	Motorola	1,0 m	\vec{n}	FDD	30,209
13	1	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	PP	30,531
14	1	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	PP	30,636
15	1	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	30,514
16	1	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	32,484
17	1	Motorola	1,5 m	\vec{n}	PP	31,460
18	1	Motorola	1,5 m	\vec{n}	PP	30,612
19	1	Motorola	1,5 m	\vec{n}	FDD	30,431
20	1	Motorola	1,5 m	\vec{n}	FDD	30,500
21	1	Motorola	1,5 m	\vec{e}_x	PP	31,019
22	1	Motorola	1,5 m	\vec{e}_x	PP	0,000
23	1	Motorola	1,5 m	\vec{e}_x	FDD	31,124
24	1	Motorola	1,5 m	\vec{e}_x	FDD	30,739
25	1	Samsung	0,5 m	\vec{n}	PP	30,877
26	1	Samsung	0,5 m	\vec{n}	FDD	30,675
27	1	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	PP	30,258
28	1	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	30,115
29	1	Samsung	1,0 m	\vec{n}	PP	30,557
30	1	Samsung	1,0 m	\vec{n}	FDD	30,495
31	1	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	PP	30,448
32	1	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	30,150
33	1	Samsung	1,5 m	\vec{n}	PP	30,670
34	1	Samsung	1,5 m	\vec{n}	FDD	30,142
35	1	Samsung	1,5 m	\vec{e}_x	PP	30,689
36	1	Samsung	1,5 m	\vec{e}_x	FDD	30,591
37	2	Motorola	0,5 m	\vec{n}	PP	29,942
38	2	Motorola	0,5 m	\vec{n}	PP	30,524
39	2	Motorola	0,5 m	\vec{n}	FDD	29,994
40	2	Motorola	0,5 m	\vec{n}	FDD	30,230

Tableau D.4 Tensions mécaniques mesurées avec la nouvelle technique - partie 2

Essai	Hauban	Cellulaire	Position	Direction	Méthode	Tension (kN)
41	2	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	PP	30,164
42	2	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	PP	30,436
43	2	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	30,231
44	2	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	30,154
45	2	Motorola	1,0 m	\vec{n}	PP	30,425
46	2	Motorola	1,0 m	\vec{n}	PP	30,801
47	2	Motorola	1,0 m	\vec{n}	FDD	29,883
48	2	Motorola	1,0 m	\vec{n}	FDD	31,012
49	2	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	PP	30,486
50	2	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	PP	30,639
51	2	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	30,345
52	2	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	30,455
53	2	Samsung	0,5 m	\vec{n}	PP	31,018
54	2	Samsung	0,5 m	\vec{n}	PP	31,010
55	2	Samsung	0,5 m	\vec{n}	FDD	30,867
56	2	Samsung	0,5 m	\vec{n}	FDD	31,063
57	2	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	PP	30,701
58	2	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	PP	31,373
59	2	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	30,336
60	2	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	30,338
61	2	Samsung	1,0 m	\vec{n}	PP	30,342
62	2	Samsung	1,0 m	\vec{n}	PP	31,210
63	2	Samsung	1,0 m	\vec{n}	FDD	30,241
64	2	Samsung	1,0 m	\vec{n}	FDD	33,138
65	2	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	PP	30,607
66	2	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	PP	30,797
67	2	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	30,543
68	2	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	30,783
69	3	Motorola	0,5 m	\vec{n}	PP	31,575
70	3	Motorola	0,5 m	\vec{n}	PP	31,603
71	3	Motorola	0,5 m	\vec{n}	FDD	31,276
72	3	Motorola	0,5 m	\vec{n}	FDD	31,343
73	3	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	PP	31,714
74	3	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	PP	31,588
75	3	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	31,694
76	3	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	31,602
77	3	Motorola	1,0 m	\vec{n}	PP	31,454
78	3	Motorola	1,0 m	\vec{n}	PP	32,103
79	3	Motorola	1,0 m	\vec{n}	FDD	31,445
80	3	Motorola	1,0 m	\vec{n}	FDD	31,823

Tableau D.5 Tensions mécaniques mesurées avec la nouvelle technique - partie 3

Essai	Hauban	Cellulaire	Position	Direction	Méthode	Tension (kN)
81	3	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	PP	32,148
82	3	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	PP	31,502
83	3	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	32,153
84	3	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	31,531
85	3	Samsung	0,5 m	\vec{n}	PP	37,974
86	3	Samsung	0,5 m	\vec{n}	PP	31,533
87	3	Samsung	0,5 m	\vec{n}	FDD	41,350
88	3	Samsung	0,5 m	\vec{n}	FDD	31,487
89	3	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	PP	30,383
90	3	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	30,266
91	3	Samsung	1,0 m	\vec{n}	PP	31,363
92	3	Samsung	1,0 m	\vec{n}	FDD	31,152
93	3	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	PP	32,166
94	3	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	31,818
95	4	Motorola	0,5 m	\vec{n}	PP	33,843
96	4	Motorola	0,5 m	\vec{n}	PP	33,954
97	4	Motorola	0,5 m	\vec{n}	FDD	33,885
98	4	Motorola	0,5 m	\vec{n}	FDD	32,361
99	4	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	PP	32,804
100	4	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	PP	33,900
101	4	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	34,354
102	4	Motorola	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	34,094
103	4	Motorola	1,0 m	\vec{n}	PP	33,674
104	4	Motorola	1,0 m	\vec{n}	PP	33,475
105	4	Motorola	1,0 m	\vec{n}	FDD	34,075
106	4	Motorola	1,0 m	\vec{n}	FDD	33,431
107	4	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	PP	34,113
108	4	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	PP	34,103
109	4	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	32,418
110	4	Motorola	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	33,194
111	4	Samsung	0,5 m	\vec{n}	PP	33,902
112	4	Samsung	0,5 m	\vec{n}	PP	33,959
113	4	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	34,167
114	4	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	34,149
115	4	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	PP	44,037
116	4	Samsung	0,5 m	\vec{e}_x	FDD	34,203
117	4	Samsung	1,0 m	\vec{n}	PP	34,838
118	4	Samsung	1,0 m	\vec{n}	FDD	34,927
119	4	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	PP	34,407
120	4	Samsung	1,0 m	\vec{e}_x	FDD	34,513