

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie civil

Effets de l'ajout d'un mécanisme ductile à la  
console sur la réponse d'un pylône aux bris de  
conducteurs

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie civil

Louis-Philippe BÉRUBÉ

Jury : Jean PROULX  
Frédéric LÉGERON (directeur)  
Jean-François GRAVEL

Sherbrooke (Québec) Canada

Janvier 2012

IV -2198



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*ISBN: 978-0-494-90948-5*

*Our file Notre référence*

*ISBN: 978-0-494-90948-5*

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

# RÉSUMÉ

Les bris de conducteurs causent des efforts dynamiques importants pouvant causer de lourds dommages sur les pylônes de ligne de transport. Les efforts peuvent être tels qu'ils peuvent causer la ruine en cascade de plusieurs pylônes. Cette recherche porte sur l'étude de l'effet de l'ajout d'un mécanisme ductile à la console d'un pylône soumis à un bris de conducteur. L'étude est composée de deux phases complémentaires, l'une expérimentale comportant l'utilisation d'un banc d'essais à échelle réduite, et l'autre numérique utilisant le logiciel Code-Aster pour la modélisation d'essais dynamiques comportant un mécanisme ductile à la console.

Les essais à échelle réduite comportaient huit essais élastiques et onze essais comportant un fusible ductile à la console. Lors des essais, le fusible ductile a démontré sa capacité à réduire les efforts dynamiques au canton. La réponse du mécanisme en fonction de sa capacité ductile a démontré qu'une capacité trop faible n'apportait aucun gain sur la réduction des efforts et que l'étude de la capacité requise se doit d'être étudiée pour un cas donné.

Les modélisations par éléments finis effectuées à l'aide du logiciel Code-Aster ont su représenter la réponse dynamique obtenue lors des essais. Les modélisations élastiques ont permis une représentation des déformations plastiques ainsi que des déplacements. Une modélisation a de plus été effectuée sur une géométrie réelle de pylône pour évaluer les gains possibles suite à l'ajout d'un mécanisme ductile à la console. Les résultats obtenus valident les résultats du banc d'essais en présentant une réduction des efforts de bris au canton de l'ordre de 35%.

**Mots-clés :** Ligne de transport électrique, Bris de conducteurs, éléments finis, échelle réduit



# REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier Frédéric Légeron qui a été un directeur exemplaire. Il s'est présenté comme un guide, me donnant la marge de manoeuvre nécessaire pour développer mon autonomie et bâtir ma propre vision de l'ingénierie tout en apportant des réflexions critiques et formatrices permettant de faire de moi un meilleur ingénieur.

Je remercie particulièrement Simon Prud'homme, collègue et ami, avec qui j'ai pu travailler, partager et apprendre tout au long de ces années de maîtrise et pour encore de nombreuses années. Les problématiques que nous avons attaquées ensemble ne sont jamais restées sans solutions.

Merci à ma conjointe Primalia et mon fils Samuel qui ont dû vivre mon absence dans les derniers mois de cette maîtrise et qui m'ont toujours encouragé.

Merci à Serge Bérubé, mon père, qui m'a transmis le plaisir des sciences depuis mon enfance.

Merci à Louis Cloutier pour sa sagesse, les nombreuses discussions que nous avons eues ensemble m'ont permis d'ouvrir bien des réflexions sur le domaine du génie.

Merci à Frédéric Turcotte et Daniel Breton pour leur travail dévoué et professionnel qui a permis la réalisation de ce projet, votre travail a rendu des idées réelles.

Merci, tout particulier, à toute l'équipe professorale du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke pour la formation d'une qualité exceptionnelle qui me permet d'attaquer les problématiques d'ingénierie sur une base solide tous les jours.

Merci à tous mes collègues avec qui j'ai eu la chance de travailler durant ces années à l'Université de Sherbrooke, tout particulièrement Jean-Yves Taillon, Étienne Desjardins, Mathieu Ashby, Éric Morrissette et tous les membres passés et présents de la chaire de recherche en structure et mécanique de ligne de transport.

Merci spécial à Jean-François Gravel et Normand Lemieux qui me permettent maintenant de travailler dans le domaine des lignes de transport, au sein d'une équipe d'un professionnalisme et de compétences hors du commun.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1	Mise en contexte . . . . .	1
1.1.1	Problématique des cascades dans l'histoire des lignes de transport . . . . .	1
1.2	Travaux antérieurs . . . . .	2
1.2.1	Essais à échelle réelle et réduite . . . . .	2
1.2.2	Essais à échelle réduite . . . . .	3
1.2.3	Approche analytique . . . . .	8
1.2.4	Mécanisme de confinement des ruines . . . . .	9
1.3	Objectifs du projet de recherche . . . . .	13
1.4	Présentation du document . . . . .	14
<b>2</b>	<b>PROGRAMME EXPÉRIMENTAL</b>	<b>15</b>
2.1	Banc d'essais à échelle réduite . . . . .	15
2.1.1	Description du montage . . . . .	15
2.1.2	configuration générale de l'essai . . . . .	16
2.1.3	Description du pylône . . . . .	18
2.1.4	Essais sans mécanisme fusible ductile à la console . . . . .	18
2.1.5	Essais avec insertion de fusibles ductiles à la console . . . . .	19
2.1.6	Description du conducteur . . . . .	24
2.1.7	Description de l'instrumentation . . . . .	25
<b>3</b>	<b>RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX</b>	<b>27</b>
3.1	Essais sans mécanisme ductile à la console . . . . .	28
3.1.1	Présentation des résultats . . . . .	29
3.1.2	Reproductibilité des essais . . . . .	38
3.2	Essais avec fusible ductile à la console . . . . .	48
<b>4</b>	<b>ANALYSE DES RÉSULTATS</b>	<b>55</b>
4.1	Essais avec console sans dispositif fusible ductile . . . . .	55
4.1.1	Généralités observées sur la réponse dynamique du canton pour une tension de 53.4 N . . . . .	55
4.1.2	Effet de la fréquence de la structure . . . . .	56
4.1.3	Effet de la longueur des chaînes d'isolateurs . . . . .	59
4.2	Essais avec fusible ductile à la console . . . . .	63
4.2.1	Effet global de modification des efforts . . . . .	65
4.2.2	Mécanisme de réponse de la console modifiée . . . . .	68
<b>5</b>	<b>MODÉLISATION PRÉLIMINAIRE</b>	<b>87</b>
5.1	Approche de modélisation par éléments finis . . . . .	87
5.2	Modélisation des essais de MOZER [1978] . . . . .	87
5.3	Résultats de la validation élastique des essais . . . . .	89

5.4	MODÉLISATION DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX . . . . .	100
<b>6</b>	<b>MODÉLISATION D'UN CANTON</b>	<b>115</b>
6.1	Définition du problème étudié . . . . .	115
6.1.1	Géométrie du canton . . . . .	115
6.1.2	Modèle du portique . . . . .	116
6.2	Résultats . . . . .	119
6.2.1	Modèle avec plaque de 45 mm . . . . .	119
6.2.2	Modèle avec plaque de 25 mm . . . . .	122
6.2.3	Modèle avec plaque de 37 mm d'épaisseur à la console . . . . .	124
6.2.4	Observations générales . . . . .	125
<b>7</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Annexe A</b>	<b>129</b>
<b>B</b>	<b>Annexe B</b>	<b>137</b>
B.1	Résultats des essais de ruptures de conducteurs . . . . .	137
B.1.1	Cas A1 . . . . .	137
B.1.2	Cas A2 . . . . .	139
B.1.3	Cas A3 . . . . .	141
B.1.4	Cas A4 . . . . .	143
B.1.5	Cas A5 . . . . .	145
B.1.6	Cas A6 . . . . .	147
B.1.7	Cas A7 . . . . .	149
B.1.8	Cas A8 . . . . .	151
B.1.9	Cas A17 . . . . .	153
B.1.10	Cas A18 . . . . .	155
B.1.11	Cas A19 . . . . .	157
B.1.12	Cas A20 . . . . .	159
B.1.13	Cas A21 . . . . .	161
B.1.14	Cas A22 . . . . .	163
B.1.15	Cas A23 . . . . .	165
B.1.16	Cas A24 . . . . .	167
B.1.17	Cas A25 . . . . .	169
B.1.18	Cas A26 . . . . .	171
B.1.19	Cas A27 . . . . .	173
	<b>LISTE DES RÉFÉRENCES</b>	<b>177</b>

# LISTE DES FIGURES

1.1	Montage expérimental pour les études de réponses aux bris de conducteur [KEMPNER, 1997] . . . . .	4
1.2	Modèle global [MOZER, 1978] . . . . .	5
1.3	Détail de la structure réduite [MOZER, 1978] . . . . .	6
1.4	Corrélation entre les facteurs d'impact obtenus et l'équation de Peyrot [MOZER, 1978]) . . . . .	7
1.5	Courbe de facteur d'impact selon Mozer pour $T/AE < 0.001$ [MOZER, 1978])	7
1.6	Comparaison de la traction dans le conducteur entre un modèle 3D et un modèle 2D [LAPOINTE, 2003]) . . . . .	9
1.7	Console fusible [Chappé et al., 1948] . . . . .	10
1.8	Console fusible [ENR, 1928] . . . . .	11
1.9	Pince fusible [Miller, 1932] . . . . .	11
1.10	Fusible unidirectionnel à la console [Fleming, 1933] . . . . .	12
1.11	Fusible multidirectionnel à la console [Goia, 1993] . . . . .	12
1.12	Fusible limiteur de traction IREQ-SLACAN [Iordanescu, 2000] . . . . .	13
2.1	Vue en élévation du pylône . . . . .	16
2.2	Dimensions du banc d'essai . . . . .	17
2.3	Position de la zone de bris . . . . .	17
2.4	Bras de console déformé suite à une rupture de conducteur . . . . .	20
2.5	Structure pylône d'alignement - Vue générale . . . . .	21
2.6	Structure pylône d'alignement - Base, vue transversale à la ligne . . . . .	22
2.7	Structure pylône d'alignement - Base, axe de la ligne . . . . .	23
2.8	Courbe de sensibilité à la vitesse de déformation de l'acier [JONES, 1989] .	24
2.9	Courbe de sensibilité à la vitesse de déformation de l'aluminium 6061-T6 [JONES, 1989] . . . . .	24
2.10	Positionnement de l'instrumentation . . . . .	26
3.1	Nomenclature des moments utilisés lors de l'analyse . . . . .	27
3.2	Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 1 pour l'essai A3-1 . .	30
3.3	Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 2 pour l'essai A3-1 . .	30
3.4	Exemple de réponse du moment, à la console du pylône 1 pour l'essai A3-1	31
3.5	Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 1 pour l'essai A8-1 . .	32
3.6	Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 2 pour l'essai A8-1 . .	33
3.7	Exemple de réponse du moment, à la console du pylône 1 pour l'essai A8-1	33
3.8	Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 1 pour l'essai A5-1 . .	36
3.9	Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 2 pour l'essai A5-1 . .	36
3.10	Exemple de réponse du moment, à la console du pylône 1 pour l'essai A5-1	37
3.11	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a3-1 et a3-2 à la base	41
3.12	Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais a3-1 et a3-2 à la base	42

3.13	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a3-1 et a3-2 à la console . . . . .	43
3.14	Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais a3-1 et a3-2 déplacement à la tête . . . . .	43
3.15	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a5-1 et a5-2 à la base	44
3.16	Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais a5-1 et a5-2 à la base	44
3.17	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a5-1 et a5-2 à la console . . . . .	45
3.18	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a5-1 et a5-2 à la tête	45
3.19	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a6-1 et a6-2 à la base du pylône 1 . . . . .	46
3.20	Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais a6-1 et a6-2 à la base du pylône 2 . . . . .	46
3.21	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a6-1 et a6-2 à la console du pylône 1 . . . . .	47
3.22	Réponse du pylône 1 entre les essais A21 à la base . . . . .	50
3.23	Réponse du pylône 2 entre les essais A21 à la base . . . . .	51
3.24	Réponse du pylône 1 entre les essais A21 à la console . . . . .	51
3.25	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais A25 à la base . . .	52
3.26	Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais A25 à la base . . .	52
3.27	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais A25 à la console . .	53
4.1	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a3-1 et a8-1 à la base	57
4.2	Analyses fréquentielles des réponses au essais A3-1 et A8-1 . . . . .	58
4.3	Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a3-1 et a8-1 à la console . . . . .	59
4.4	Comparaison de la réponse du pylône 1 en fonction de la longueur des chaînes d'isolateurs . . . . .	60
4.5	Comparaison de la réponse du pylône 2 en fonction de la longueur des chaînes d'isolateurs . . . . .	61
4.6	Analyses fréquentielles des réponses au essais A3-1 et A5-1 . . . . .	61
4.7	Comparaison des moments résiduels et dynamiques maximaux en fonction des longueurs de chaînes d'isolateurs . . . . .	62
4.8	Réponse dynamique transitoire à la console du pylône 1 pour les cas a3-1 et a5-1 . . . . .	62
4.9	Courbe de ratio des moments à la base du pylône 1 en fonction de la dimension de la section du fusible . . . . .	66
4.10	Courbe de ratio des moments à la base du pylône 2 en fonction de la dimension de la section du fusible . . . . .	66
4.11	Courbe de ratio des moments du système en fonction de la dimension de la section du fusible . . . . .	67
4.12	Domaine de réponse en présence d'un mécanisme à la console . . . . .	68
4.13	Efforts à la base du pylône 1 pour les essais A17, A18 et A3 . . . . .	69
4.14	Efforts à la console du pylône 1 pour les essais A17, A18 et A3 . . . . .	71

4.15 Efforts à la console du pylône 1 pour les essais A17, A18 et A3 pour les dix premières ms . . . . .	71
4.16 Durée de l'effort de pointe pour le cas A3 . . . . .	72
4.17 Période du second mode du pylône 1 . . . . .	72
4.18 Comparaison des efforts à la base du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23	73
4.19 Comparaison des efforts à la console du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23 . . . . .	74
4.20 Comparaison des efforts à la console du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23 - [0 - 100ms] . . . . .	75
4.21 Comparaison des efforts à la base du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23	76
4.22 Comparaison des efforts à la base du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23 - avec correction pour le moment résiduel final . . . . .	76
4.23 Comparaison des efforts à la console durant la première pointe suite au bris pour les cas A3, A23 et A22 . . . . .	78
4.24 Comparaison des efforts au pylône 2 pour les cas A3, A23 et A22 . . . . .	79
4.25 Augmentation du temps de chute pour les conducteurs de la portée 1, cas A3, A23 et A22 . . . . .	80
4.26 Évaluation des efforts de la première pointe par représentation d'une onde carrée, cas A3, A23 et A22 . . . . .	80
4.27 Comportement transitoire à la console du pylône 1, cas A3, A19 et A21 . . . . .	82
4.28 Comportement transitoire à la console du pylône 1 [0-150ms], cas A3, A19 et A21 . . . . .	82
4.29 Comportement transitoire du cas A3 . . . . .	83
4.30 Comportement transitoire du cas A19 . . . . .	83
4.31 Comportement transitoire du cas A21 . . . . .	84
5.1 Résultats E20 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	93
5.2 Résultats E20 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	93
5.3 Résultats E21 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	94
5.4 Résultats E21 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	94
5.5 Résultats E22 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	95
5.6 Résultats E22 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	95
5.7 Résultats E31 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	96
5.8 Résultats E31 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	96
5.9 Résultats E35 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	97
5.10 Résultats E35 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	97
5.11 Résultats E36 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	98
5.12 Résultats E36 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms) . . . . .	98
5.13 Résultats E21 Moment à la base + Câble de garde Élasto-plastique . . . . .	99
5.14 Résultats E22 Moment à la base + Câble de garde Élasto-plastique . . . . .	100
5.15 Résultats A2-1, A2-2 et Modèle Code-Aster - Moment à la base du pylône 1	101
5.16 Résultats A2-1, A2-2 et Modèle Code-Aster - Moment à la base du pylône 2	102
5.17 Résultats A2-1, A2-2 et Modèle Code-Aster - Moment à la console du pylône 1	102
5.18 Représentation schématique de la section inférieure du pylône . . . . .	103
5.19 Modélisation complète de la section fusible de console du pylône 1 . . . . .	104

5.20	Section plan pour représentation de la distribution des fibres . . . . .	105
5.21	Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A18 . . . . .	107
5.22	Rotation de la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A18 . . . . .	108
5.23	Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A22 . . . . .	109
5.24	Rotation de la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A22 . . . . .	109
5.25	Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A27 . . . . .	110
5.26	Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A19 . . . . .	111
5.27	Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A21 . . . . .	111
5.28	Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A20 . . . . .	112
5.29	Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A27 . . . . .	112
5.30	Comparaison des rotations de console entre les modèles du domaine 3 . . .	113
6.1	Géométrie du portique de suspension . . . . .	116
6.2	Zone de bris du conducteur entre les pylônes 2 et 3 - conducteur en contact avec le sol . . . . .	117
6.3	Zone de bris du conducteur entre les pylônes 2 et 3 . . . . .	118
6.4	Réponse dynamique du conducteur et de la chaîne suivant le bris . . . . .	118
6.5	Réponse dynamique transitoire des pylônes 3, 4 et 5 - Cas de référence . .	119
6.6	Réponse dynamique transitoire des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 45 mm . . . . .	120
6.7	Contrainte maximale à la section réduite des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 45 mm . . . . .	121
6.8	Déformation de la console au pylône 3 - configuration avec une section de 45 mm . . . . .	121
6.9	Réponse dynamique transitoire des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 25 mm . . . . .	122
6.10	Contrainte maximal à la section réduite des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 25 mm . . . . .	123
6.11	Déformation de la console au pylône 3 - configuration avec une section de 25 mm . . . . .	123
6.12	Réponse dynamique transitoire des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 36 mm . . . . .	124
6.13	Contrainte maximal à la section réduite des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 36 mm . . . . .	125
A.1	Grille de correspondances des résultats - [MOZER, 1978] . . . . .	129

A.2 Réponse transitoire pour le cas E20 - [MOZER, 1978]	130
A.3 Réponse transitoire pour le cas E21 - [MOZER, 1978]	131
A.4 Réponse transitoire pour le cas E22 - [MOZER, 1978]	132
A.5 Réponse transitoire pour le cas E31 - [MOZER, 1978]	133
A.6 Réponse transitoire pour le cas E35 - [MOZER, 1978]	134
A.7 Réponse transitoire pour le cas E36 - [MOZER, 1978]	135
B.1 Moment à la base du pylône 1 - Cas a1-1 et a1-2	137
B.2 Moment à la base du pylône 2 - Cas a1-1 et a1-2	138
B.3 Moment à la console du pylône 1 - Cas a1-1 et a1-2	138
B.4 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a1-1 et a1-2	139
B.5 Moment à la base du pylône 1 - Cas a2-1 et a2-2	139
B.6 Moment à la base du pylône 2 - Cas a2-1 et a2-2	140
B.7 Moment à la console du pylône 1 - Cas a2-1 et a2-2	140
B.8 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a2-1 et a2-2	141
B.9 Moment à la base du pylône 1 - Cas a3-1 et a3-2	141
B.10 Moment à la base du pylône 2 - Cas a3-1 et a3-2	142
B.11 Moment à la console du pylône 1 - Cas a3-1 et a3-2	142
B.12 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a3-1 et a3-2	143
B.13 Moment à la base du pylône 1 - Cas a4-1 et a4-2	143
B.14 Moment à la base du pylône 2 - Cas a4-1 et a4-2	144
B.15 Moment à la console du pylône 1 - Cas a4-1 et a4-2	144
B.16 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a4-1 et a4-2	145
B.17 Moment à la base du pylône 1 - Cas a5-1 et a5-2	145
B.18 Moment à la base du pylône 2 - Cas a5-1 et a5-2	146
B.19 Moment à la console du pylône 1 - Cas a5-1 et a5-2	146
B.20 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a5-1 et a5-2	147
B.21 Moment à la base du pylône 1 - Cas a6-1 et a6-2	147
B.22 Moment à la base du pylône 2 - Cas a6-1 et a6-2	148
B.23 Moment à la console du pylône 1 - Cas a6-1 et a6-2	148
B.24 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a6-1 et a6-2	149
B.25 Moment à la base du pylône 1 - Cas a7-1 et a7-2	149
B.26 Moment à la base du pylône 2 - Cas a7-1 et a7-2	150
B.27 Moment à la console du pylône 1 - Cas a7-1 et a7-2	150
B.28 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a7-1 et a7-2	151
B.29 Moment à la base du pylône 1 - Cas a8-1 et a8-2	151
B.30 Moment à la base du pylône 2 - Cas a8-1 et a8-2	152
B.31 Moment à la console du pylône 1 - Cas a8-1 et a8-2	152
B.32 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a17-1	153
B.33 Moment à la base du pylône 1 - Cas a17-1	153
B.34 Moment à la base du pylône 2 - Cas a17-1	154
B.35 Moment à la console du pylône 1 - Cas a17-1	154
B.36 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a17-1	155
B.37 Moment à la base du pylône 1 - Cas a18-1	155
B.38 Moment à la base du pylône 2 - Cas a18-1	156

B.39 Moment à la console du pylône 1 - Cas a18-1	156
B.40 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a18-1	157
B.41 Moment à la base du pylône 1 - Cas a19-1	157
B.42 Moment à la base du pylône 2 - Cas a19-1	158
B.43 Moment à la console du pylône 1 - Cas a19-1	158
B.44 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a19-1	159
B.45 Moment à la base du pylône 1 - Cas a20-1	159
B.46 Moment à la base du pylône 2 - Cas a20-1	160
B.47 Moment à la console du pylône 1 - Cas a20-1	160
B.48 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a20-1	161
B.49 Moment à la base du pylône 1 - Cas a21-1	161
B.50 Moment à la base du pylône 2 - Cas a21-1	162
B.51 Moment à la console du pylône 1 - Cas a21-1	162
B.52 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a21-1	163
B.54 Moment à la base du pylône 2 - Cas a22-1	163
B.53 Moment à la base du pylône 1 - Cas a22-1	164
B.55 Moment à la console du pylône 1 - Cas a22-1	164
B.56 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a22-1	165
B.58 Moment à la base du pylône 2 - Cas a23-1	165
B.57 Moment à la base du pylône 1 - Cas a23-1	166
B.59 Moment à la console du pylône 1 - Cas a23-1	166
B.60 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a23-1	167
B.62 Moment à la base du pylône 2 - Cas a24-1	167
B.61 Moment à la base du pylône 1 - Cas a24-1	168
B.63 Moment à la console du pylône 1 - Cas a24-1	168
B.64 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a24-1	169
B.66 Moment à la base du pylône 2 - Cas a25-1	169
B.65 Moment à la base du pylône 1 - Cas a25-1	170
B.67 Moment à la console du pylône 1 - Cas a25-1	170
B.68 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a25-1	171
B.70 Moment à la base du pylône 2 - Cas a26-1	171
B.69 Moment à la base du pylône 1 - Cas a26-1	172
B.71 Moment à la console du pylône 1 - Cas a26-1	172
B.72 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a26-1	173
B.74 Moment à la base du pylône 2 - Cas a27-1	173
B.73 Moment à la base du pylône 1 - Cas a27-1	174
B.75 Moment à la console du pylône 1 - Cas a27-1	174
B.76 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a27-1	175

# LISTE DES TABLEAUX

1.1	Résultats des essais avec pylône élastique . . . . .	2
1.2	Essais à échelle réelle [PEABODY, 2004] . . . . .	3
1.3	Essais à échelle réduite [PEABODY, 2004] . . . . .	3
1.4	Relation de similitude . . . . .	3
1.5	Tensions maximums obtenues entre le modèle 3D et 2D [LAPOINTE, 2003] . . . . .	8
2.1	Description des essais sans mécanisme ductile à la console . . . . .	18
2.2	Configuration des essais avec présence d'un mécanisme ductile à la console . . . . .	20
2.3	Configuration des essais avec présence d'un mécanisme ductile à la console . . . . .	21
3.1	Résultats des essais sur la variation de la tension initiale avec console élastique au pylône 1 . . . . .	29
3.2	Résultats des essais sur la variation de la tension initiale avec console élastique au pylône 2 . . . . .	29
3.3	Résultats des essais sur la variation de la fréquence avec console élastique au pylône 1 . . . . .	34
3.4	Résultats des essais sur la variation de la fréquence avec console élastique au pylône 2 . . . . .	34
3.5	Résultats des essais sur la variation de la longueur de la chaîne d'isolateurs avec console élastique au pylône 1 . . . . .	35
3.6	Résultats des essais sur la variation de la longueur de la chaîne d'isolateurs avec console élastique au pylône 2 . . . . .	35
3.7	Moyennes et écarts types pour les essais avec console élastique au pylône 1 . . . . .	39
3.8	Moyennes et écarts types pour les essais avec console élastique au pylône 2 . . . . .	40
3.9	Résultats des essais avec fusible ductile à la console . . . . .	49
4.1	Résultats des essais avec pylône élastique et tension de 53.4N pour le pylône 1 en fonction de la tension initiale et de la tension résiduelle . . . . .	56
4.2	Résultats des essais avec pylône élastique et tension de 53.4N pour le pylône 2 en fonction de la tension initiale et de la tension résiduelle . . . . .	56
4.3	Comparaison des efforts à la base des pylônes 1 et 2 en fonction de la fréquence des pylônes . . . . .	57
4.4	Comparaison des efforts en fonction de la longueur de la chaîne d'isolateurs . . . . .	60
4.5	Résultats des essais avec fusible ductile à la console . . . . .	64
4.6	Moments maximaux et résiduels pour les pylônes du domaine 1 . . . . .	70
4.7	Moments résiduels pour les pylônes du domaine 1 et le cas A23[1.78mm] - configuration sans chaîne d'isolateurs . . . . .	75
4.8	Moments maximaux et moments résiduels pour les pylônes du domaine 2 comparaison avec la valeurs de référence - configuration sans chaîne d'isolateurs . . . . .	77
4.9	Réponse théorique à une impulsion carrée au pylônes 1 . . . . .	79

4.10	Moments maximaux et moments résiduels pour les pylônes de la phase 3 - configuration sans chaîne d'isolateurs . . . . .	81
5.1	Liste des paramètres d'essais pour les modélisations basées sur les essais de Mozer [MOZER, 1978] . . . . .	88
5.2	Liste des résultats expérimentaux-Moment à la base du pylône . . . . .	91
5.3	Liste des résultats expérimentaux-Cisaillement à la base de la console . . . . .	92
5.4	Modélisation élastique à l'aide du Logiciel Code-Aster, résultats à la base du pylône 1 pour les cas A1-A5 . . . . .	103
5.5	Modélisation élastique à l'aide du Logiciel Code-Aster, résultats à la base du pylône 2 pour les cas A1-A5 . . . . .	103
5.6	Résultats des modélisations avec fusibles à la console . . . . .	106
6.1	Propriétés du canton à l'étude . . . . .	115
6.2	Propriétés des conducteurs et câbles de garde . . . . .	115

# LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
$[\ ]$	Dérivée première selon le référentiel inertiel
$[\ ]$	Dérivée seconde selon le référentiel inerti
$a$	Accélération
$m$	Masse
$t$	Variable temporelle
$T$	Période de la structure
$t_1$	Durée de l'impulsion
$l_{porte}$	Portée entre les pylônes
$L_0$	Longueur à vide d'un câble
$\Delta T_{thermcable}$	Variation thermique appliquée aux conducteurs
$\alpha_{cable}$	Coefficient de dilatation thermique du câble
$T_{ini}$	Tension initiale
$T_{res}$	Tension résiduelle
$T_{max}$	Tension maximum
$M_{ini}$	Moment initiale
$M_{res}$	Moment résiduelle
$M_{max}$	Moment maximum
$L_{ISO}$	Longueur de la chaîne d'isolateur
$EP$	Épaisseur de la section réduite de la console



# LISTE DES ACRONYMES

<b>Acronyme</b>	<b>Définition</b>
OIQ	Ordre des ingénieurs du Québec
UdeS	Université de Sherbrooke
EDF R&D	Électricité de France, Recherche et développement
EPRI	Electric Power Research Institute
BPA	BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION



# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte

Les lignes de transport électrique haute tension sont conçues pour résister aux charges climatiques, principalement le vent, la glace ainsi que les charges de service et de construction. En plus des charges de service usuelles, les lignes peuvent être soumises à des charges suite à un bris de composante, d'une chute de pylône ou d'une erreur humaine. Les efforts engendrés par les bris sont dynamiques et ne sont pas pris en compte de façon directe par les normes en vigueur. Ces événements peuvent donc causer, dans certains cas, une rupture dite en cascade qui entraînerait successivement deux ou plusieurs structures. La conception des différentes structures pour ces charges dynamiques, en plus des charges normatives existantes, n'est pas économique pour une entreprise. Les entreprises actuelles adoptent donc une politique de gestion de risque face aux situations de bris de conducteurs.

#### 1.1.1 Problématique des cascades dans l'histoire des lignes de transport

Historiquement, plusieurs cas de cascades longitudinales ont été rapportés. Le Tableau 1.1 présente un court historique des cas répertoriés de cascades longitudinales. L'ampleur des ruines obtenues varie de quelques pylônes jusqu'à une ligne complète. Les coûts associés à la reconstruction de ces lignes, ainsi que les pertes associées à l'arrêt de l'utilisation de la ligne sont très importantes pour les entreprises de transport d'énergie électrique.

Tableau 1.1 Résultats des essais avec pylône élastique

DATE	LIEUX	STRUCTURE	BRIS	NOMBRE DE STRUCTURE
1914-12		Structure [A]		56
1921-12	Nouvelle-Angleterre	Structure [S]	Conducteur et pylône	69
1921-12	Nouvelle-Angleterre	Structure [A]	Pylône d'angle	78
1924	Nouvelle-Angleterre	Structure [S]		94
1940	Ontario	Structure [B]	Bris de conducteur	100
1966	Danemark	Structure [R]	Pylône d'angle	167
1969-11	Québec	Pylône treillis	Bris de conducteur	4
1969-11	Québec	Pylône treillis	Pylône de suspension	17
1972-01	Colombie-Britannique	Pylône treillis	Pylône de suspension	21
1972-01	Wisconsin	Structure [H]	Fondation angle	32
1973-04	Québec	Pylône treillis	Bris de conducteur	2x16
1975-04	Indiana	Pylône treillis	Bris de conducteur	49
1975-01	Wisconsin	Pylône treillis	Bris de conducteur	31
1975-01	Wisconsin	Pylône treillis	Bris de conducteur	262
1975-01	Wisconsin	Portique de bois	Bris de conducteur	393
1975-10	Wisconsin	Pylône treillis [H]	Bris de conducteur	287
1975-10	Wisconsin	Pylône treillis	Bris de conducteur	53
1980-09	Wisconsin	Portique en K en bois	Bris de conducteur	227
1983	Dakota			40
1993	Nebraska	Bois	Câble de garde et isolateur	297
1993	Nebraska	Bois	Câble de garde et isolateur	177

## 1.2 Travaux antérieurs

### 1.2.1 Essais à échelle réelle et réduite

Les essais sont indispensables dans l'étude des bris de conducteur. Un essai à échelle réelle incorporant plusieurs structures requiert des budgets très importants. L'essai à échelle réduite, quant à lui, permet l'étude de plusieurs paramètres à une fraction du coût d'un essai à échelle réelle. La complexité d'utilisation d'un banc d'essais à échelle réduite dans le cadre de l'étude des bris de conducteur consiste en l'atteinte des similitudes dynamiques entre les différentes composantes du montage. Les Tableaux 1.2 et 1.3 présentent une liste d'essais, de bris de conducteur, à échelle réduite ou réelle ayant été réalisés sur un canton de ligne expérimentale.

Tableau 1.2 Essais à échelle réelle [PEABODY, 2004]

ANNEE	CONFIGURATION	VOLTAGE [kV]	Auteur
1926	Un circuit	220	Healy and Wright
1956	Treillis en acier	50	Haro
1956	Treillis en acier	110	Haro
1956	Portique de bois	110	Haro
1956	Portique haubané en acier	220	Haro
1961	Biterne en acier	138	stefoff
1976	Monopode tubulaire en acier	115	Richardson
1978	Biterne en acier	138	Payrot
1997	Monopode tubulaire en acier	138	Ostendorp
1997	Monopode tubulaire en acier	345	Ostendorp
1997	Portique en H en bois	138	Ostendorp
1997	Portique en H en bois	345	Ostendorp

Tableau 1.3 Essais à échelle réduite [PEABODY, 2004]

ANNEE	Échelle	Conducteur	Auteur
1960	1 :30	Chaîne en acier	Paris
1976	1 :50	Chaîne en acier	Richardson
1977	1 :25	Chaîne en acier	Richardson
1978	1 :30	Câble en cuivre avec ajout de masse	Mozer
1984	1 :30	Câble en cuivre avec ajout de masse	ANCO
1997	1 :23.3	Câble en acier avec ajout de masse	Kempner

## 1.2.2 Essais à échelle réduite

### Travaux de Kempner

Les essais à échelle réduite requièrent la mise en place d'une série de paramètres pour l'atteinte de la similitude dynamique. Les travaux de KEMPNER [1997] présentent les paramètres servant à la mise en place de l'échelle de similitude, voir Tableau 1.4.

Tableau 1.4 Relation de similitude

Paramètre	Échelle réelle	Échelle modèle
Dimensions	1	$\frac{1}{\text{facteur d'échelle}}$
Temps	1	$(\frac{1}{\text{facteur d'échelle}})^2$

Kempner présente le facteur d'échelle d'une ligne à échelle réduite comme étant le facteur de l'élasticité dynamique du conducteur. L'équation 1.1 présente la relation.

Deux types de conducteurs ont été étudiés pour atteindre l'échelle de similitude requise : un câble d'acier auquel des masses ont été ajoutées ponctuellement et une chaîne. L'amortissement des deux conducteurs a été étudié. Ces travaux ont démontré que la chaîne présentait le double de l'amortissement du câble d'acier, soit un amortissement visqueux de 1.65% par rapport à 0.71%. Suite à ses essais, Kempner recommande l'utilisation d'un câble en acier pour la représentation d'un conducteur.

$$\text{Élasticité dynamique du conducteur} = \frac{A_{\text{cable}} E_{\text{cable}}}{w_{\text{cable}}}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{cable}} &= \text{Aire de la section de câble} \\ E_{\text{cable}} &= \text{Module élastique du câble} \\ w_{\text{cable}} &= \text{Masse linéique du câble} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Pour ses études, Kempner a représenté le pylône par un tube rotulé, la rigidité étant contrôlée par un ressort. La Figure 1.1 présente la structure utilisée lors de l'étude.

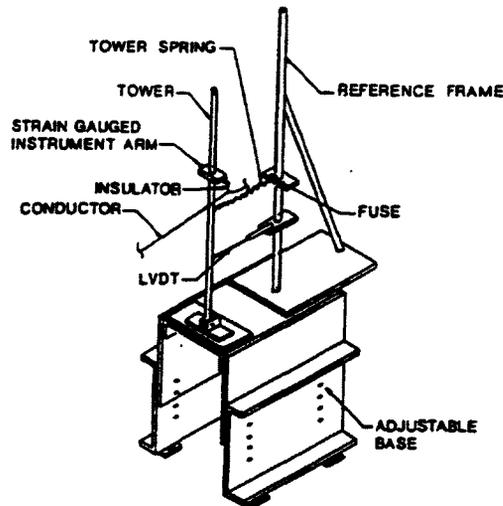


Figure 1.1 Montage expérimental pour les études de réponses aux bris de conducteur [KEMPNER, 1997]

Les essais de Kempner portaient spécialement sur l'effet de la chute d'un pylône sur les efforts dynamiques des pylônes subséquents. Les valeurs d'amplification dynamique obtenues par Kempner se situent entre 0.894 et 2.194 fois la tension initiale, variant selon la

configuration du canton. Kempner compare les efforts obtenus avec la méthode de BPA qui utilise un facteur d'amplification de 1.33. Cette valeur se situe donc dans la moyenne des résultats obtenus. Kempner recommande donc l'utilisation d'un facteur de 1.359 fois la tension horizontale pour la conception directe des structures aux efforts dynamiques et 0.768 fois la tension horizontale pour la conception macro d'un canton permettant la ruine de structure d'alignement.

**Travaux de Mozer**

MOZER [1978] à effectué une étude portant sur les efforts longitudinaux débalancés pour le compte de l'Electric Power Research Institute (EPRI). Une partie de cette étude portait sur le calcul par ordinateur de la tension résiduelle suivant un bris, l'autre portait sur une cinquantaine d'essais à échelle réduite à l'aide d'un banc composé de 2 pylônes et 3 portées. Une série d'essais portait sur la réponse dynamique aux bris de conducteur et l'autre sur la chute de glace. Les Figures 1.2 et 1.3 présentent le montage utilisé lors des essais.

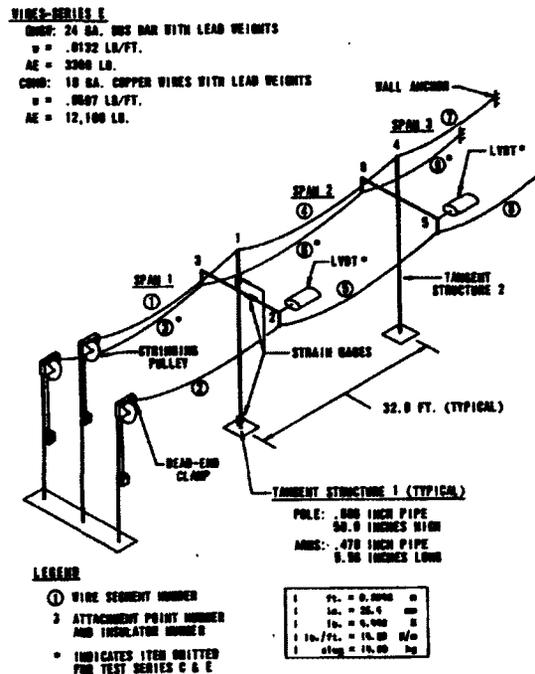


Figure 1.2 Modèle global [MOZER, 1978]

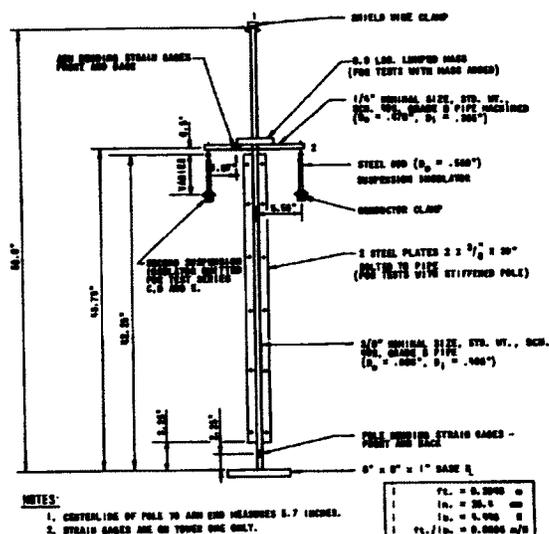


Figure 1.3 Détail de la structure réduite [MOZER, 1978]

Le rapport de Mozer présente comme conclusion que l'analyse des efforts sur le pylône lors d'un de bris doit prendre en compte la réponse de la structure. En effet, lors de ses essais, les efforts obtenus à la base du pylône étaient parfois supérieurs aux forces à la console, parfois inférieures. De plus, Mozer a comparé les facteurs d'impact obtenus lors de ses essais avec un équation 1.2, de Peyrot. Les résultats obtenus démontrent une bonne concordance entre les résultats des essais et l'équation de Peyrot. La Figure 1.4 présente la courbe de tendance entre les essais et l'équation. Suite à ses travaux, Mozer a présenté une série de courbes permettant d'obtenir l'effort à la console en fonction des propriétés géométriques du canton. Un exemple est présenté à la figure 1.5.

$$IF_A = 1 + \omega \left( \frac{2|E|}{\omega_c L g} \right)^{0.5}$$

$IF_A$  = Facteur d'amplification dynamique

$E$  = Changement d'énergie du conducteur entre la position initiale et finale (1.2)

$\omega$  = Pulsation propre du conducteur à sa tension résiduelle

$\omega_c L$  = Masse du conducteur

$g$  = accélération gravitationnelle



### 1.2.3 Approche analytique

Plusieurs approches analytiques ont été effectuées sur l'étude des bris de conducteurs. Les premiers modèles ont été réalisés sur l'étude de l'équilibre statique final d'un canton suite au bris.

#### Approche analytique par éléments finis

McCLURE et TINAWI [1989] ont publié des travaux portant sur la modélisation de la réponse dynamique des essais de Mozer [MOZER, 1978]. Ces travaux présentaient la première utilisation d'un logiciel généraliste d'éléments finis pour la résolution de la réponse aux bris de conducteurs. Les résultats obtenus démontrent la capacité d'un logiciel d'éléments finis généraliste à représenter la réponse dynamique d'un canton soumis à un bris de conducteur.

LAPOINTE [2003] a présenté l'analyse de la ruine d'une ligne de transport électrique 120 kV biterne suite à la tempête de verglas de 1997. Il a réalisé une modélisation élastique 3D complète d'une ligne de pylône à l'aide du logiciel ADINA. Il a de plus présenté, la réponse d'un système 2D simplifié en comparaison à un modèle 3D. Les résultats présentent de grandes différences. Celles-ci proviennent de la rigidité longitudinale et torsionnelle prise en compte à l'aide d'une modélisation 3D du pylône, ce qui démontre l'importance d'étudier le comportement complet du système lors de l'étude d'une ligne soumise à un bris de conducteur. La Figure 1.6 présente un exemple de comparaison de la traction dans le conducteur en fonction du temps entre le modèle 2D et 3D. Les résultats des différents modèles sont présentés au Tableau 1.5

Tableau 1.5 Tensions maximums obtenues entre le modèle 3D et 2D [LAPOINTE, 2003]

Numéro Support	Modèle 2D [kN]	Modèle 3D $Cond_{c3}$ [kN]	Modèle 3D $Cond_{c5}$ [kN]	Moyenne [%]
Arret <sub>L</sub>	115	95	100	+18
SP1	90	85	85	+6
SP2	85	83	86	+1
SP3	75	68	64	+14
SP4	105	80	88	+31
SP5	105	80	79	+32
Arret <sub>L</sub>	115	95	100	+8

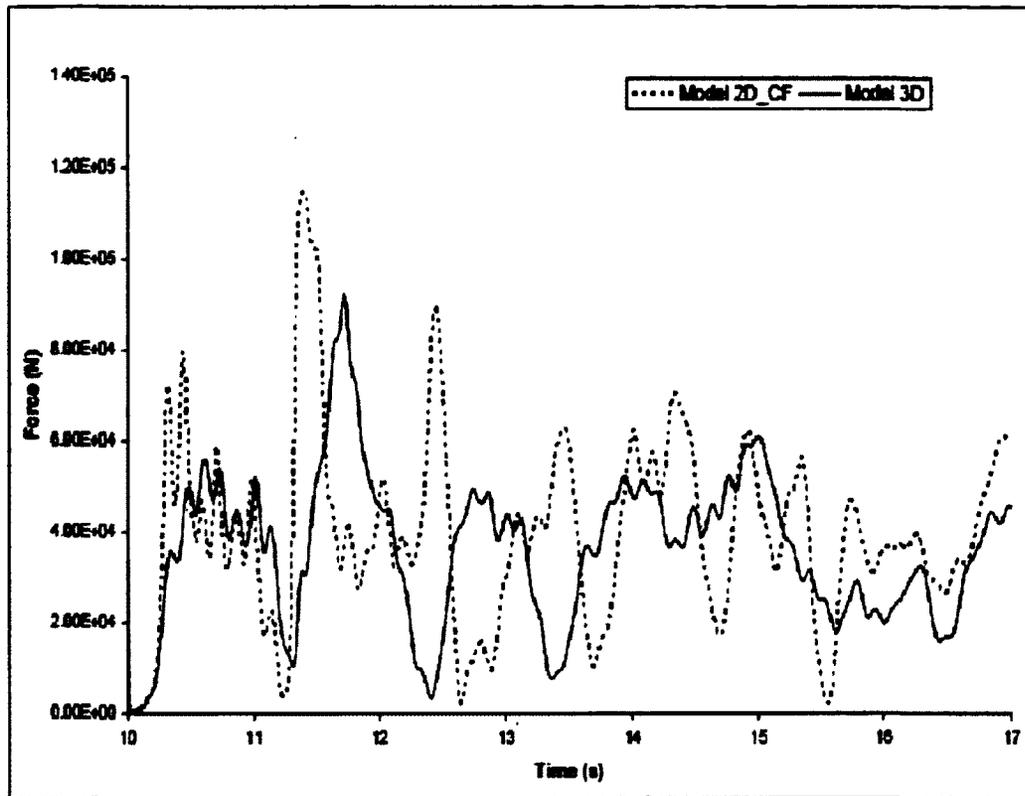


Figure 1.6 Comparaison de la traction dans le conducteur entre un modèle 3D et un modèle 2D [LAPOINTE, 2003])

#### 1.2.4 Mécanisme de confinement des ruines

Telles que présentées précédemment, les ruines en cascades ne sont pas une problématique nouvelle pour les gestionnaires de réseaux. Afin de permettre un meilleur contrôle lors des surcharges mécaniques et de limiter les risques de cascades, plusieurs mécanismes ont été développés. Ces mécanismes se classent dans diverses catégories. Le confinement direct, provenant de la modification structurale du pylône, les mécanismes unidirectionnels ciblant une orientation donnée des tensions mécaniques et les mécanismes multidirectionnels offrant un relâchement dans le sens de la tension du conducteur.

##### Mécanisme par confinement direct

Le confinement direct peut se présenter sous plusieurs formes : l'ajout de structures compétentes pour retenir les charges suite aux bris et ainsi limiter les cascades sur un certain nombre de structures, la conception de structures pour la reprise des charges dynamiques

d'impact et la modification structurale directe pour le relâchement local des efforts sans mécanismes externes.

### Insertion de pylône compétent

L'insertion de pylône compétent est utilisée dans la procédure de conception de ligne de BPA [KEMPNER, 1997]. Le principe de confinement est basé sur l'hypothèse que l'impact d'un bris possède un facteur d'amplification dynamique de 1.33. Selon ce principe, la ruine d'un pylône d'alignement entraîne une réduction de 50% de cet effort dynamique pour réduire l'effort au second pylône à 0.67.

D'autres méthodes consistent en la modification du pylône pour permettre une séquence de ruine favorable, permettant ainsi la réduction des efforts dans le canton. Dans les années 40, [Chappé et al., 1948] ont présenté un mécanisme de réduction permettant à la console de se rabattre lors d'efforts suite à un bris de conducteur. La Figure 1.7 présente le mécanisme.

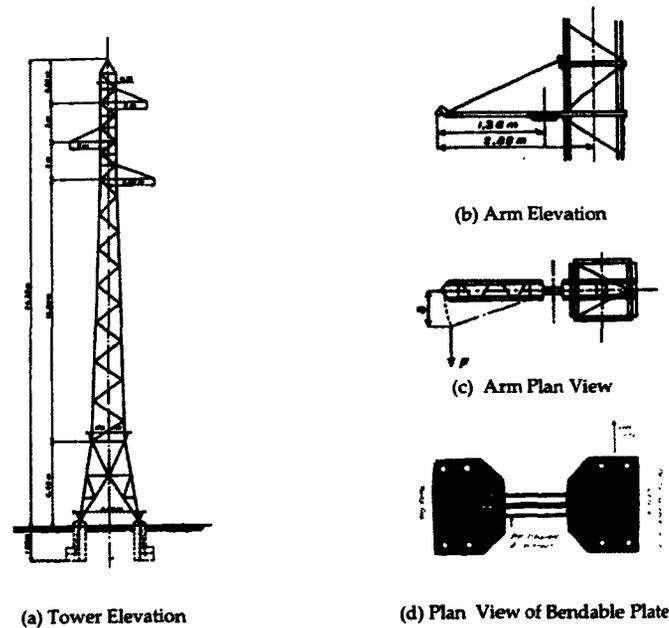


Figure 1.7 Console fusible [Chappé et al., 1948]

L'utilisation de consoles fusibles avec présence d'une tige de cisaillement a été présentée comme solution de limitation mécanique [ENR, 1928]. La Figure 1.8 présente l'une des premières versions répertoriées. Deux problématiques se sont présentées avec ce type de mécanisme. La première étant celle de constance, la fabrication des fusibles ne permettant pas d'obtenir une rupture à une charge prédéterminée. L'autre problématique en est une

de maintenance. L'ajout d'un mécanisme avec une nomenclature de type fusible engendre une crainte de la part des unités de maintenance ainsi que les problèmes de droit découlant d'un bris volontaire de la structure.

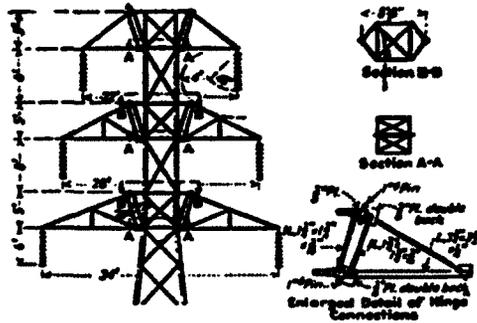


Figure 1.8 Console fusible [ENR, 1928]

### Mécanismes fusibles

Une panoplie de mécanismes fusibles a été développée pour limiter les efforts aux pylônes lors de surcharges mécaniques provenant des conducteurs. Un court échantillonnage a été effectué, les résultats sont présentés à la liste suivante :

**Pince de suspension avec glissement** Les pinces de suspension avec glissement fonctionnent sous divers mécanismes. Leurs principes sont de permettre le glissement du conducteur dans la pince à l'atteinte d'une charge limite. Différents mécanismes sont disponibles, la Figure 1.9 présente un modèle développé par Miller [1932]. Les pinces à glissement sont reconnues pour être sensibles à l'accumulation de glace limitant le déclenchement du mécanisme.

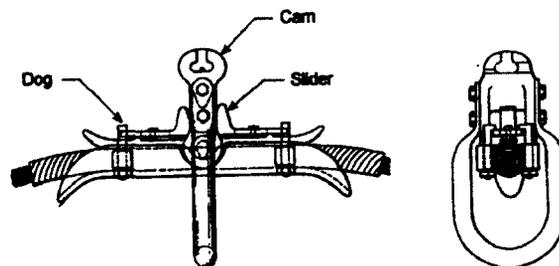


Figure 1.9 Pince fusible [Miller, 1932]

**Fusible à la console - unidirectionnel** Différents mécanismes installés à la console ont été conçus au cours des années. Ces mécanismes ont généralement comme avantage de réduire la torsion au pylône, mais ils possèdent des capacités limitées en ce qui a trait à la réduction des efforts longitudinaux. La Figure 1.10 présente un mécanisme développé par Fleming [1933].

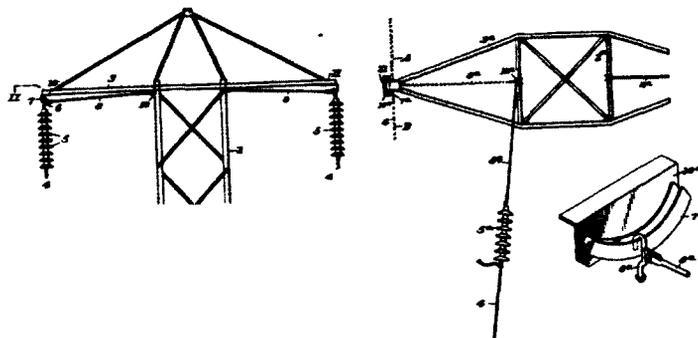


Figure 1.10 Fusible unidirectionnel à la console [Fleming, 1933]

**Fusible à la console - multidirectionnel** Les fusibles multidirectionnels présentent l'avantage de posséder une limite de rupture dépendant de l'axe de chargement. Ceci a pour objectif d'offrir la possibilité de déterminer l'effort limite de la console par direction. La Figure 1.11 présente une configuration d'un mécanisme multidirectionnel. La contrainte principale d'un tel mécanisme est la variabilité des matériaux composant les fusibles, ce qui entraîne une charge limite variable.

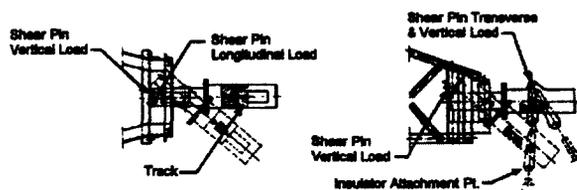


Figure 1.11 Fusible multidirectionnel à la console [Goia, 1993]

Le fusible présenté à la Figure 1.12 présente la propriété de limiter les efforts dans la direction de la tension. Lors de l'atteinte de la charge critique, la section cède en tension et libère la pince. Ceci a pour effet de limiter les efforts au pylône à une tension donnée.

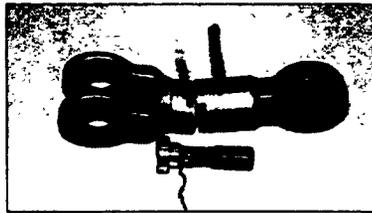


Figure 1.12 Fusible limiteur de traction IREQ-SLACAN [Iordanescu, 2000]

### 1.3 Objectifs du projet de recherche

Le confinement des ruines étant étudié depuis plus d'un siècle, une multitude de mécanismes et de méthode de confinement ont été développés. Beaucoup de ces mécanismes sont décrits dans la littérature, mais peu semblent avoir été utilisés sur les réseaux. L'utilisation de consoles avec fusible a été faite dans les années 20 sur les lignes de transport. L'implantation de fusibles ductiles étant utilisée dans d'autres domaines du génie civil, par exemple pour la protection au séisme, l'étude d'une adaptation de cette méthode pour l'utilisation sur les lignes de transport se présente comme étant une avenue intéressante. Les études récentes portant sur des fusibles se limitent principalement aux mécanismes fragiles. L'objectif de ce travail est d'étudier qualitativement l'apport d'un mécanisme ductile à la console sur la réponse dynamique d'un canton lors de bris de conducteurs.

Les travaux de modélisation existants ont permis de présenter une méthode de modélisation d'un canton soumis à un bris de conducteur. Présentement, les approches par éléments finis permettent la représentation d'un canton avec un comportement élastique. L'utilisation de matériaux non linéaires reste à valider et est très sensible au logiciel utilisé. À notre connaissance, aucun cas pouvant servir à la validation en non linéaires matériaux n'est disponible.

Pour cette raison la première étape était donc de bâtir un banc d'essai à échelle réduite ayant deux objectifs : le premier étant d'étudier l'effet de l'ajout d'un mécanisme ductile à la console d'un pylône lors d'un bris de conducteurs, le second étant de fournir des cas permettant la validation d'un outil numérique par éléments finis.

La seconde étape était la mise au point d'une approche numérique fiable par éléments finis permettant la représentation d'un canton lors d'un bris de conducteur avec présence d'un mécanisme ductile à la console. Cette étape a été effectuée en 2 phases :

1) la modélisation des essais de Mozer pour la validation d'une section de canton sans prise en compte de non-linéarité matériaux ;

2) la modélisation des essais effectués dans le cadre de cette étude pour valider la capacité du modèle numérique à représenter la réponse d'une section de canton avec fusible ductile à la console.

La dernière étape de cette étude était de modéliser une section de ligne avec des paramètres réels en lui ajoutant un mécanisme ductile à la console pour en étudier son comportement. Cette étape permettra d'ouvrir la porte à l'utilisation d'un modèle dans un contexte industriel.

## 1.4 Présentation du document

Les sections suivantes seront discutées dans les chapitres subséquents. Le chapitre 2 présente la description du modèle expérimental. Les composantes du canton ainsi que l'instrumentation utilisée y sont décrites. Le chapitre 3 porte sur la présentation des résultats expérimentaux obtenus lors des essais à échelle réduite. Les problématiques rencontrées lors des essais y sont aussi présentées. Le chapitre 4 porte sur l'analyse des résultats expérimentaux évaluant les effets des divers paramètres d'étude ainsi que l'effet de l'ajout d'un fusible ductile à la console. Le chapitre 5 porte sur les modélisations par éléments finis effectuées sur les essais de Mozer ainsi que les modèles élastiques et non linéaires effectués sur les essais de cette étude. Le chapitre 6 porte sur la modélisation d'une configuration réelle permettant d'étudier l'effet d'un mécanisme ductile sur des paramètres de ligne. Le chapitre 7 présente la conclusion.

# CHAPITRE 2

## PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

### 2.1 Banc d'essais à échelle réduite

L'objectif du projet est d'évaluer le comportement d'une ligne munie de consoles-fusibles ductiles. Pour atteindre cet objectif, un programme expérimental à deux volets a été défini. Le premier volet consiste en une configuration dans laquelle le pylône à échelle réduite conserve un comportement élastique et l'autre volet consiste en une configuration dans laquelle le pylône est modifié par l'ajout d'un fusible ductile à la console.

#### 2.1.1 Description du montage

L'objectif du montage est de représenter qualitativement la réponse d'un canton lors d'un bris de conducteur. Une échelle de 1 :40 était utilisée pour le dimensionnement général des pylônes et du conducteur. L'atteinte complète de la similitude n'était pas recherchée puisqu'elle est très complexe à obtenir dans un système non-linéaire. L'objectif de l'expérimentation est donc de créer des cas de validation non linéaires des outils numériques et d'évaluer qualitativement l'effet de l'ajout d'un fusible ductile les effets de similitude rendant difficile la transposition directe. Pour couvrir les besoins de cette étude, le montage devait répondre aux contraintes suivantes :

- posséder un système permettant de modifier la rigidité du pylône;
- permettre le changement de la longueur de la chaîne d'isolateur ;
- permettre l'ajustement de la tension du conducteur ;
- permettre l'ajout d'un fusible à la console.

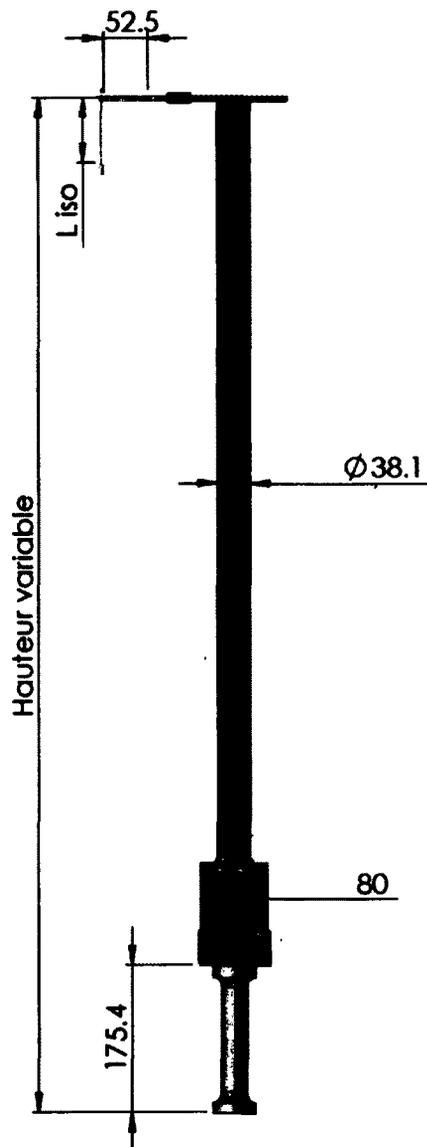


Figure 2.1 Vue en élévation du pylône

### 2.1.2 configuration générale de l'essai

Le montage est composé de pylônes d'alignements et de deux pylônes d'arrêts, séparé par des portées de 7.5m pour une longueur totale de 37.5m, la Figure 2.2 présente les configurations globales du banc. La mise en tension du conducteur ainsi que le bris était effectué à la portée 1, la Figure 2.3 présente le positionnement utilisé. Le bris est effectué entre les pylônes 1 et 2.

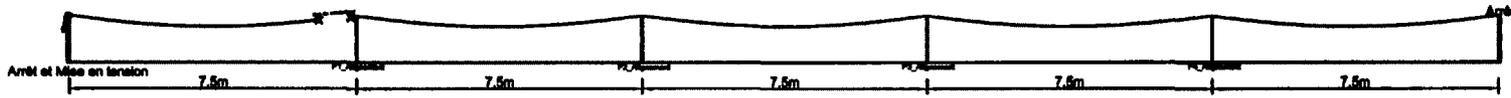


Figure 2.2 Dimensions du banc d'essai

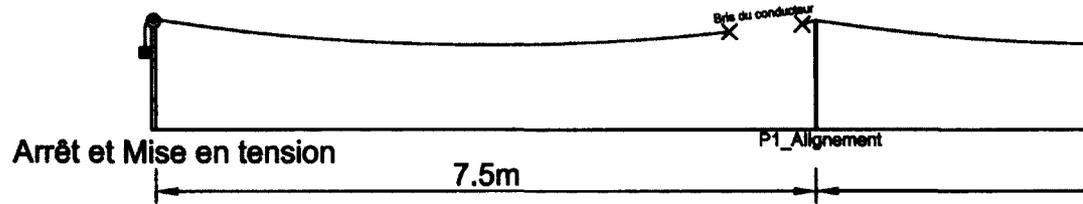


Figure 2.3 Position de la zone de bris

### 2.1.3 Description du pylône

### 2.1.4 Essais sans mécanisme fusible ductile à la console

La première phase des essais comporte trois objectifs. Le premier est de valider la méthode expérimentale de mise en place des conducteurs et des bris de câbles, dans le but d'obtenir des résultats constants et reproductibles. Le second objectif est d'identifier l'effet de différents paramètres géométriques sur la réponse dynamique des pylônes. Pour ce faire, les pylônes ont été modifiés dans le but de faire varier leur rigidité, la longueur de leurs chaînes d'isolateurs ainsi que la tension des câbles afin d'en étudier les effets. Le dernier objectif est de fournir des valeurs de référence aux essais avec mécanisme ductile à la console. Puisque cette phase élastique servira de référence, les essais ont tous été effectués en duplicata afin de limiter l'erreur sur les valeurs du programme expérimental de référence. Le tableau 2.1 présente la description des essais réalisés dans le cadre de la phase d'essais sans mécanisme fusible ductile à la console.

Tableau 2.1 Description des essais sans mécanisme ductile à la console

NOM	TYPE	TENSION (N)	L ISO (mm)	PLAQUE
A1-1	ELAS	17.8	0	ACIER
A1-2	ELAS	17.8	0	ACIER
A2-1	ELAS	35.6	0	ACIER
A2-2	ELAS	35.6	0	ACIER
A3-1	ELAS	53.4	0	ACIER
A3-2	ELAS	53.4	0	ACIER
A4-1	ELAS	53.4	25	ACIER
A4-2	ELAS	53.4	25	ACIER
A5-1	ELAS	53.4	76	ACIER
A5-2	ELAS	53.4	76	ACIER
A6-1	ELAS	53.4	0	ALU
A6-2	ELAS	53.4	0	ALU
A7-1	ELAS	53.4	25	ALU
A7-2	ELAS	53.4	25	ALU
A8-1	ELAS	53.4	76	ALU
A8-2	ELAS	53.4	76	ALU

### **Tension initiale du conducteur**

La première variable expérimentale est la tension initiale. Ce paramètre est le plus complexe à ajuster, car la tension doit être constante entre chacune des portées. Pour ajuster ce paramètre, le câble était mis sous tension à l'aide d'une masse sur poulie au niveau de l'un des pylônes d'arrêt. Les pinces étaient desserrées pour permettre le glissement du câble. Les flèches du câble étaient par la suite vérifiées à chacune des portées afin d'assurer une tension constante. Finalement, les chaînes d'isolateurs étaient replacées à la verticale avant le serrage des pinces. Lors de ces essais, l'effet de trois niveaux de tension sur la réponse dynamique de trois pylônes a été étudié. Les niveaux de tension étudiés sont présentés au tableau 2.1.

### **Rigidité du pylône**

La deuxième variable expérimentale est la rigidité du pylône, pour faire varier la rigidité plusieurs épaisseurs de plaque ont été conçues pour être installées à la base du pylône. La modification de la plaque à la base permet de conserver la même déformée modale pour le premier mode, ce qui facilite la comparaison entre les deux cas. La modification de la fréquence s'effectue donc en changeant la composition du matériel composant la plaque. Le tableau 2.1 présente les différentes configurations.

### **Longueur de la chaîne d'isolateurs**

Les essais faisant varier la longueur de la chaîne d'isolateurs ont tous été réalisés à une tension de 53.4 N et avec un pylône ayant une fréquence propre de 8 Hz. Trois longueurs de chaînes ont été étudiées, soient 0 mm, 25 mm et 76 mm. Une fois remis à l'échelle 1 : 40, ces longueurs représentent une chaîne de longueur supérieure à celle installée, une chaîne près de la longueur installée et une configuration sans chaîne.

## **2.1.5 Essais avec insertion de fusibles ductiles à la console**

Les essais avec ductilité ont été réalisés en modifiant une section de la console du premier pylône pour y ajouter une zone à capacité flexionnelle réduite. Les consoles sont donc modifiées sur une longueur de 12 mm pour permettre de réduire la capacité de celles-ci dans l'axe de la ligne. Pour ces essais, le comportement non linéaire se limitait donc à cette partie de la console. La Figure 2.4 présente une section modifiée de la console suite à un essai.



Figure 2.4 Bras de console déformé suite à une rupture de conducteur

Pour ces essais, le pylône était configuré pour obtenir une fréquence de 8 Hz. De plus, la tension du canton était ajustée à 53.4 N. L'objectif est de fixer certains paramètres dans le but de limiter le nombre d'essais. Mis à part la console du premier pylône, le seul paramètre modifié entre les essais était la longueur de la chaîne d'isolateurs : 0 et 76mm. Différentes sections réduites de la console ont été installées sur le pylône 1. Les Tableaux 2.2 et 2.3 présentent les différentes configurations étudiées.

Tableau 2.2 Configuration des essais avec présence d'un mécanisme ductile à la console

NOM	TYPE	ÉPAISSEUR (mm)	L ISO (mm)	PLAQUE
A20-1	Ductile	0.81	0	ACIER
A21-1	Ductile	1.02	0	ACIER
A19-1	Ductile	1.27	0	ACIER
A22-1	Ductile	1.52	0	ACIER
A23-1	Ductile	1.78	0	ACIER
A18-1	Ductile	2.11	0	ACIER
A17-1	Ductile	2.59	0	ACIER
A3-1	Référence	6.35	0	ACIER
A3-2	Référence	6.35	0	ACIER



Figure 2.5 Structure pylône d'alignement - Vue générale

### La longueur de la chaîne d'isolateurs

Les chaînes d'isolateurs sont composées d'un fil d'acier auquel un bloc entaillé permettant l'insertion du conducteur a été ajouté. Le remplacement du fil d'acier permet la modification de la longueur de la chaîne d'isolateurs.

### La rigidité du pylône

Tableau 2.3 Configuration des essais avec présence d'un mécanisme ductile à la console

NOM	TYPE	ÉPAISSEUR (mm)	L ISO (mm)	PLAQUE
A26-1	Ductile	0.76	76	ACIER
A25-1	Ductile	1.27	76	ACIER
A27-1	Ductile	1.52	76	ACIER
A24-1	Ductile	1.78	76	ACIER
A5-1	Référence	6.35	76	ACIER
A5-2	Référence	6.35	76	ACIER

Afin de simplifier le modèle expérimental, la flexibilité du pylône était concentrée dans une plaque à sa base. La modification des paramètres de cette plaque entraîne donc directement la modification de la fréquence du pylône. Lors des essais, deux types de plaques ont été utilisés, soit l'une composée d'acier et l'autre d'aluminium. La Figure 2.6 présente la plaque retenue par deux mâchoires prévues à cet effet. Les mâchoires sont constituées d'une section principale massive dans laquelle des cales appropriées étaient insérées lors de l'installation des plaques. Le tout est retenu par une série de vis de pression permettant de distribuer la pression de retenue sur la largeur de la plaque et ainsi limiter la rotation dans le plan de la plaque.

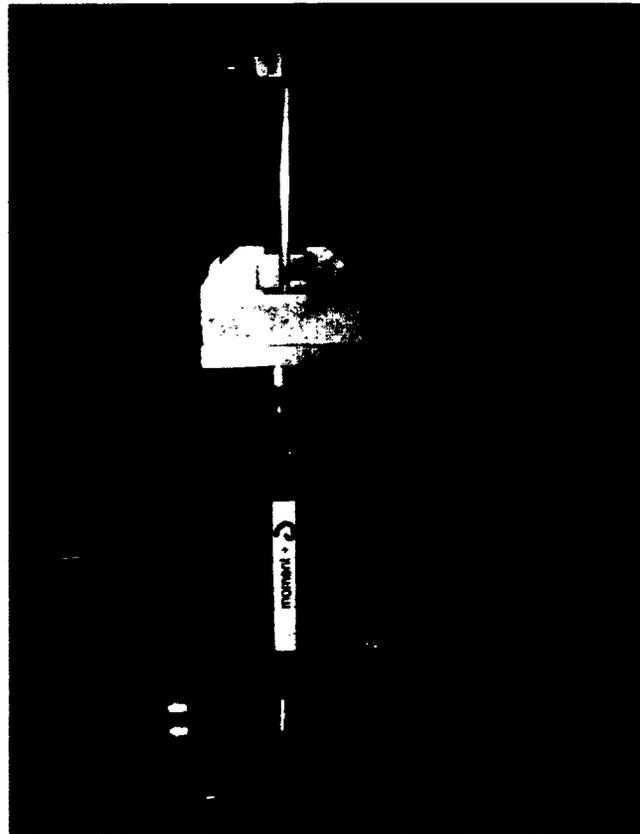


Figure 2.6 Structure pylône d'alignement - Base, vue transversale à la ligne



Figure 2.7 Structure pylône d'alignement - Base, axe de la ligne

La plaque d'acier mesurait 75 mm de hauteur par 80 mm de largeur et possédait une épaisseur de 6.35 mm. La plaque d'aluminium mesurait 100 mm de hauteur par 80 mm de largeur et possédait une épaisseur de 6.35 mm

#### **La ductilité de la console**

Lors des essais préliminaires, une console rigide a été utilisée dans le but de faciliter l'étude des autres paramètres. La conception de la console permet aussi l'ajout d'une section fusible (voir Figure 2.4). Pour ce faire, nous avons conçu une section de transition au pylône, permettant ainsi d'accueillir la section variable de la console. Les consoles ductiles ont été conçues avec une entaille permettant de limiter la capacité maximale en flexion. Le matériel utilisé pour la fabrication des consoles est de l'aluminium 6061-T6. L'objectif était de limiter la dépendance à la vitesse de déformation. La fabrication de la console dans de l'acier doux aurait complexifié l'analyse par éléments finis. Les Figures 2.8 et 2.9 présentent la sensibilité de l'acier et celle de l'aluminium à la vitesse de déformation. Sur ces figures, on peut voir que la limite élastique de l'acier ainsi que la ductilité de celui-ci est très dépendante de la vitesse de déformation. Par contre, l'aluminium ne présente pas ce type de problème, celui-ci répond de façon identique, peu importe la vitesse des déformations.

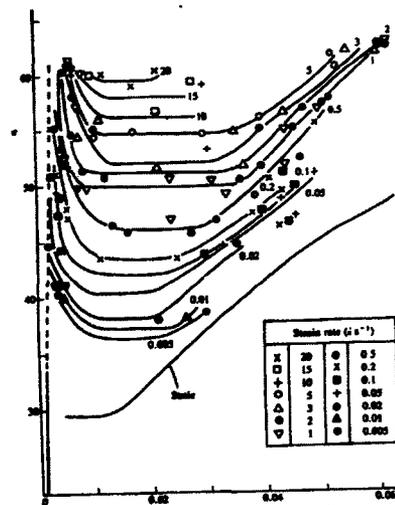


Figure 2.8 Courbe de sensibilité à la vitesse de déformation de l'acier [JONES, 1989]

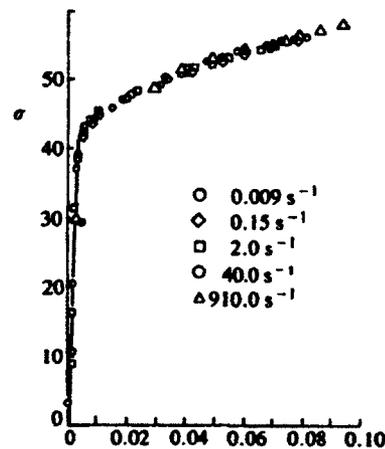


Figure 2.9 Courbe de sensibilité à la vitesse de déformation de l'aluminium 6061-T6 [JONES, 1989]

### 2.1.6 Description du conducteur

Le conducteur a été conçu pour obtenir une rigidité dynamique équivalente selon l'équation 1.1. Le conducteur était un câble d'acier inoxydable de 0.45 mm de diamètre. Des plombs de pêche ont été ajoutés pour atteindre un ratio dynamique de similitude de 1 : 40 pour correspondre aux paramètres utilisés par Kempner. La similitude est calculée selon les

équations présentées par Kempner 1.1. Les plombs # 8 étaient positionnées à tous les 75 mm sur la longueur totale de la portée. Les poids unitaires étaient de 3 g.

### 2.1.7 Description de l'instrumentation

Deux facteurs ont influencé le choix de l'instrumentation. Premièrement, le besoin de connaître les efforts à différents endroits sur la structure pour permettre une comparaison avec les modèles analytiques. Deuxièmement, la durée d'un essai de bris étant de l'ordre de 0.4 seconde, l'instrumentation devait permettre l'acquisition des données à une fréquence élevée. La Figure 2.10 présente le positionnement des divers instruments ayant servi à l'acquisition de données lors des essais. L'instrumentation était donc composée de :

- deux capteurs laser Sunx [Série LM10 - ANR12151][L1,L2] [+50mm 200um à 1000Hz précision] mesurant les déplacements de la console ;
- deux caméras haute vitesse motion pro redlake [C1,C2] ;
- un accéléromètre placé en tête du pylône [A1] ;
- de six jauges de déformation permettant la mesure des efforts à la console [MC1] ;
- des jauges de déformation permettant le mesure des moments à la base du pylône [MB1,MB2,MB3].



Figure 2.10 Positionnement de l'instrumentation

# CHAPITRE 3

## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Pour permettre la présentation des divers résultats, il est de mise de définir plusieurs termes et concepts qui seront utilisés au cours de la présentation et de l'analyse des résultats.

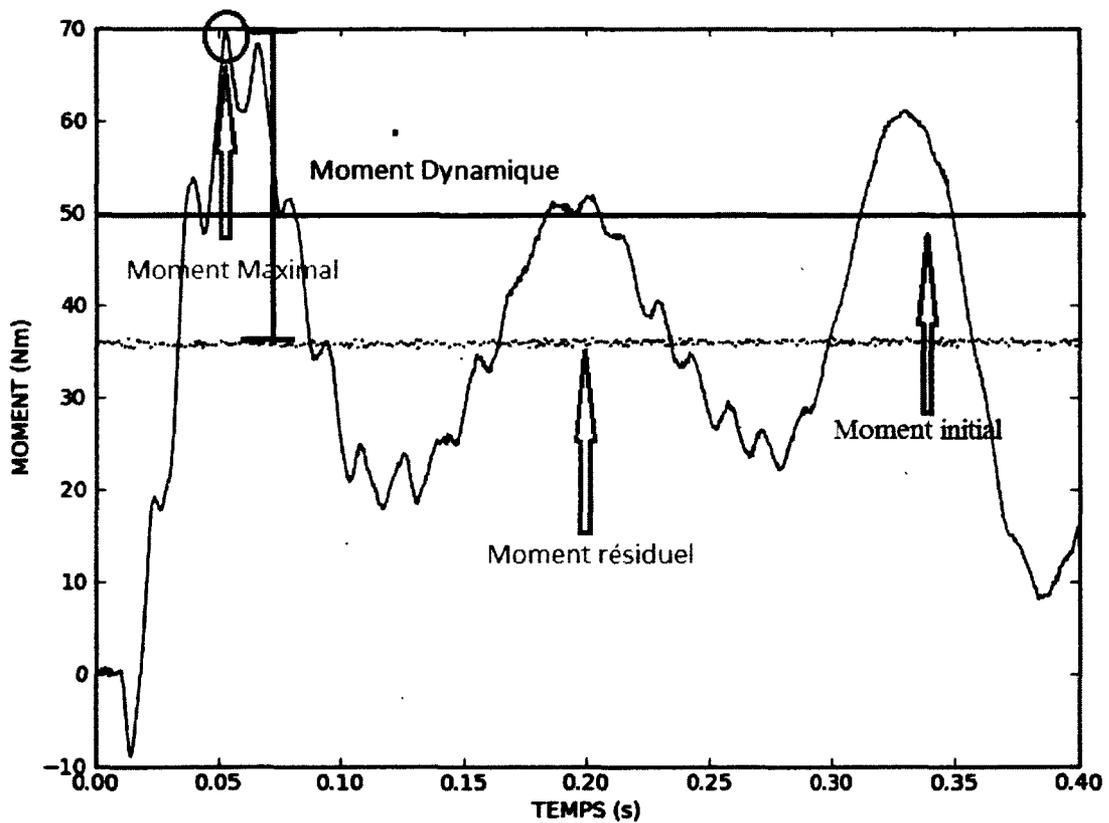


Figure 3.1 Nomenclature des moments utilisés lors de l'analyse

**Tension initiale :** La tension initiale est celle du câble dans sa configuration équilibrée avant la rupture.

**Tension résiduelle :** La tension résiduelle est celle du câble dans sa configuration rééquilibrée après la rupture.

**Moment initial** : Le moment initial est un moment virtuel calculé à partir de la tension initiale et du bras de levier entre le conducteur et le point à l'étude.

**Moment résiduel** : Le moment résiduel est le moment à l'équilibre découlant de la tension résiduelle. Dans les cas qui nous intéressent, il sera question du moment résiduel à la console ou à la base du pylône.

**Moment dynamique** : Le moment dynamique est la composante transitoire du moment entre le bris et le rééquilibrage des forces. Dans les cas qui nous intéressent, il sera question du moment dynamique à la console ou à la base du pylône.

**Moment maximal** : Le moment maximal est la somme du maximum du moment dynamique et du moment résiduel. Dans les cas qui nous intéressent, il sera question du moment maximal à la console ou à la base du pylône. Le moment est mesuré directement à partir des jauges de déformation à la base des pylônes.

La Figure 3.1 présente certains de ces termes.

### 3.1 Essais sans mécanisme ductile à la console

Pour chacun des essais, les résultats obtenus sont les suivants :

- moments à la base des pylônes 1 et 2 ;
- moments à la console du pylône 1 ;
- déplacement à la tête du pylône 1 ;
- déplacement à la console du pylône 1 ;
- accélération à la tête du pylône 1.

Ces résultats sont présentés dans la section suivante, par catégorie d'essais. Pour chacune de ces catégories, des tableaux présentant les moments maximaux et résiduels obtenus à la base des pylônes 1 et 2. La réponse transitoire à la console ainsi qu'à la base sont présentées à titre d'exemple. Cependant, les graphiques représentant les réponses transitoires de tous les essais sont fournis en annexe. Finalement, une analyse de la qualité statistique des résultats, ainsi qu'une analyse des erreurs expérimentales sont présentées dans la section reproductibilité des essais. Les résultats des accélérations ainsi que des déplacements qui ne sont pas présentés dans la présentation des résultats sont expliqués dans cette section.

### 3.1.1 Présentation des résultats

#### Influence de la tension initiale

Les Tableaux 3.1 et 3.2 présentent les résultats des moments obtenus à la base des pylônes 1 et 2 lors des essais portant sur l'effet de la variation de la tension initiale. Les Figures 3.2, 3.3 et 3.4 présentent des exemples de réponses obtenues lors de cette section des essais.

Tableau 3.1 Résultats des essais sur la variation de la tension initiale avec console élastique au pylône 1

NOM	$T_{ini}$ (N)	$L_{ISO}$ (mm)	PLAQUE	$M_{max}$ 1 (Nm)	$M_{res}$ 1 (Nm)
A1-1	17.8	0	ACIER	30.6	17.5
A1-2	17.8	0	ACIER	31.0	S.O.
A2-1	35.6	0	ACIER	49.7	27.3
A2-2	35.6	0	ACIER	47.4	S.O.
A3-1	53.4	0	ACIER	69.7	36.2
A3-2	53.4	0	ACIER	69.2	S.O.

S.O. représente les points pour lesquels aucune donnée n'est disponible puisque non enregistré

Tableau 3.2 Résultats des essais sur la variation de la tension initiale avec console élastique au pylône 2

NOM	$T_{ini}$ (N)	$L_{ISO}$ (mm)	PLAQUE	$M_{max}$ 2 (Nm)	$M_{res}$ 2 (Nm)
A1-1	17.8	0	ACIER	17.3	4.3
A1-2	17.8	0	ACIER	17.6	S.O.
A2-1	35.6	0	ACIER	33.4	10.8
A2-2	35.6	0	ACIER	30.3	S.O.
A3-1	53.4	0	ACIER	45.5	15.7
A3-2	53.4	0	ACIER	47.7	S.O.

S.O. représente les points pour lesquels aucune donnée n'est disponible puisque non enregistré

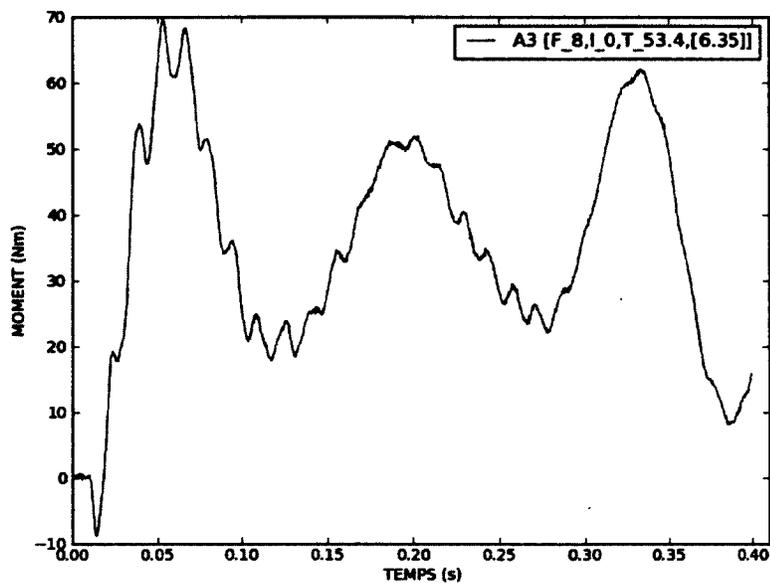


Figure 3.2 Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 1 pour l'essai A3-1

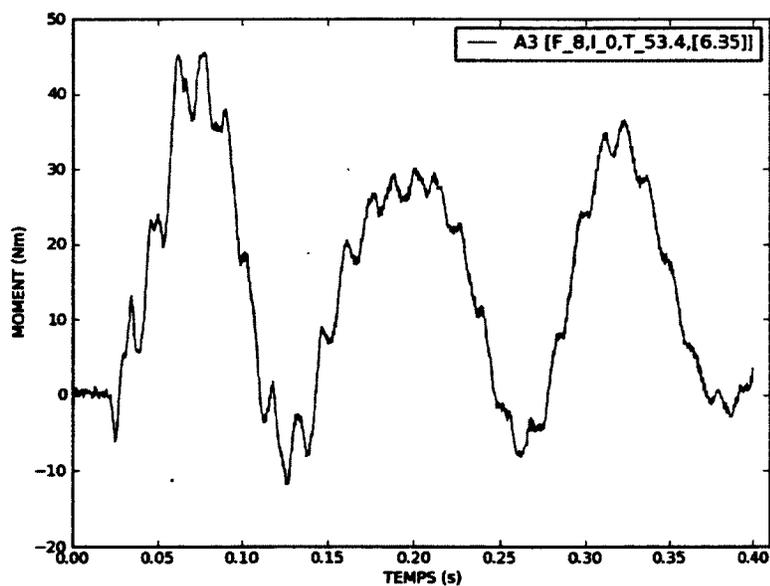


Figure 3.3 Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 2 pour l'essai A3-1

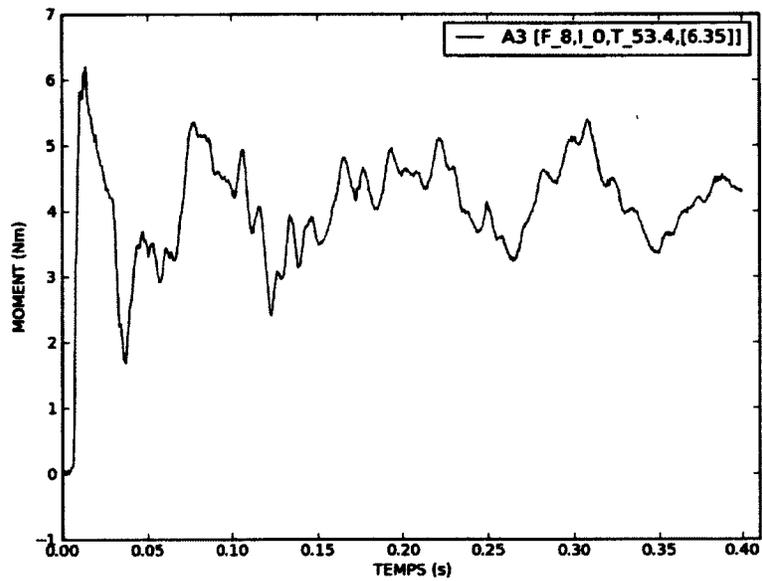


Figure 3.4 Exemple de réponse du moment, à la console du pylône 1 pour l'essai A3-1

### Variation de la rigidité

Les Tableaux 3.3 et 3.4 présentent les résultats des moments obtenus à la base des pylônes 1 et 2 lors des essais portant sur l'effet de la variation de la fréquence des pylônes. Les Figures 3.5, 3.6 et 3.7 présentent des exemples de réponses obtenues lors de cette portion des essais.

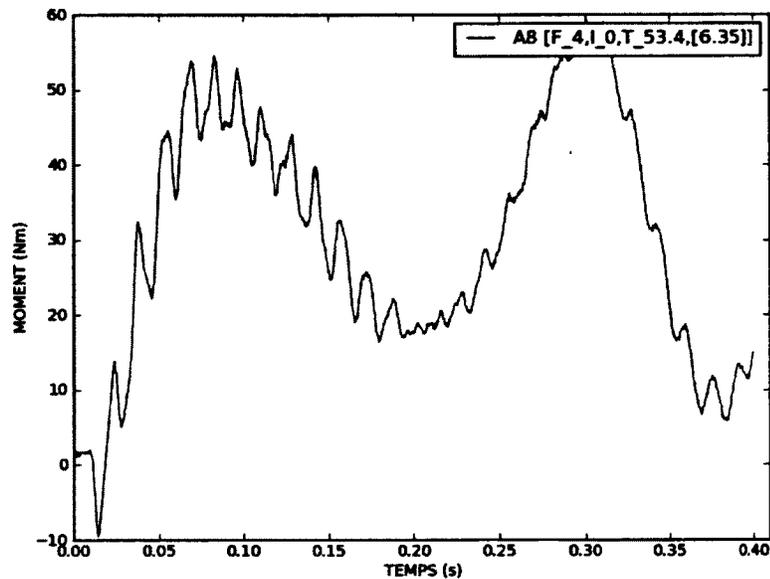


Figure 3.5 Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 1 pour l'essai A8-1

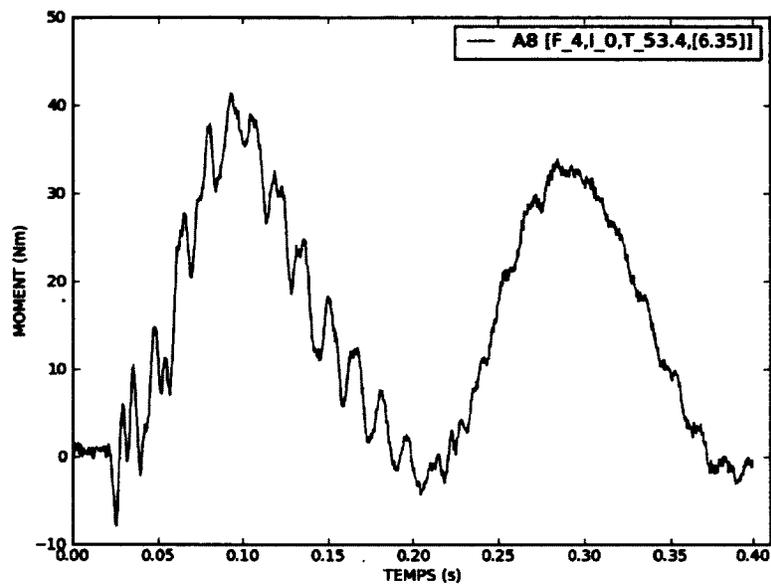


Figure 3.6 Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 2 pour l'essai A8-1

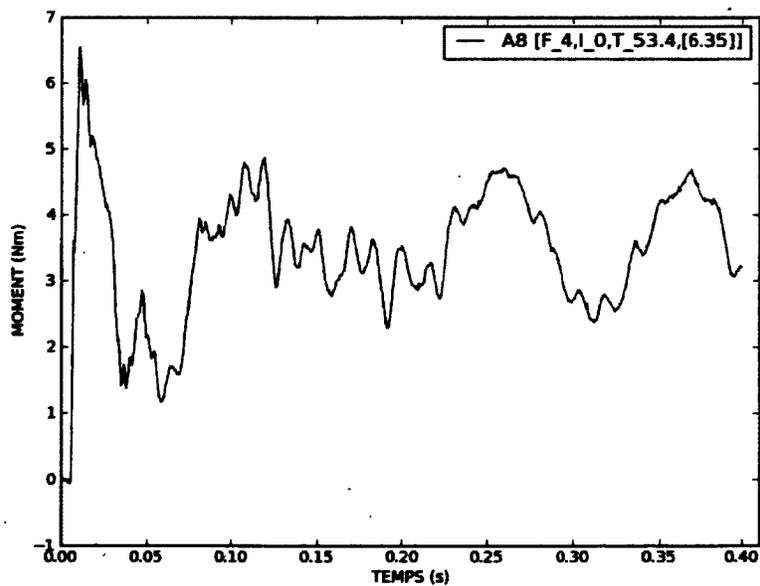


Figure 3.7 Exemple de réponse du moment, à la console du pylône 1 pour l'essai A8-1

Tableau 3.3 Résultats des essais sur la variation de la fréquence avec console élastique au pylône 1

NOM	$T_{ini}$ (N)	$L_{ISO}$ (mm)	PLAQUE	$M_{max}$ 1 (Nm)	$M_{res}$ 1 (Nm)
A1-1	17.8	0	ACIER	30.6	17.5
A1-2	17.8	0	ACIER	31.0	S.O.
A2-1	35.6	0	ACIER	49.7	27.3
A2-2	35.6	0	ACIER	47.4	S.O.
A3-1	53.4	0	ACIER	69.7	36.7
A3-2	53.4	0	ACIER	69.2	S.O.
A6-1	17.8	0	ALU	28.0	14.6
A6-2	17.8	0	ALU	32.2	S.O.
A7-1	35.6	0	ALU	-(*)	S.O.
A7-2	35.6	0	ALU	32.6	22.8
A8-1	53.4	0	ALU	59.2	31.0
A8-2	53.4	0	ALU	62.0	S.O.

Note :(\*)L'essais A7-1 a été retirée suite à un problème de mise en flèche.

Tableau 3.4 Résultats des essais sur la variation de la fréquence avec console élastique au pylône 2

NOM	$T_{ini}$ (N)	$L_{ISO}$ (mm)	PLAQUE	$M_{max}$ 2 (Nm)	$M_{res}$ 2 (Nm)
A1-1	17.8	0	ACIER	17.3	4.3
A1-2	17.8	0	ACIER	17.6	S.O.
A2-1	35.6	0	ACIER	33.4	10.8
A2-2	35.6	0	ACIER	30.3	S.O.
A3-1	53.4	0	ACIER	45.5	15.7
A3-2	53.4	0	ACIER	47.7	S.O.
A6-1	17.8	0	ALU	14.8	4.6
A6-2	17.8	0	ALU	18.1	S.O.
A7-1	35.6	0	ALU	-(*)	S.O.
A7-2	35.6	0	ALU	16.2	10.5
A8-1	53.4	0	ALU	41.4	15.6
A8-2	53.4	0	ALU	43.1	S.O.

Note :(\*)L'essais A7-1 a été retirée suite à un problème de mise en flèche.

**Variation de la longueur des chaînes d'isolateurs**

Les Tableaux 3.5 et 3.6 présentent les résultats des moments obtenus à la base des pylônes 1 et 2 lors des essais portant sur la variation de la longueur de chaîne d'isolateurs des pylônes. Dans les tableaux suivants, le paramètre  $L_{ISO}$  représente la longueur de la chaîne d'isolateur.

Tableau 3.5 Résultats des essais sur la variation de la longueur de la chaîne d'isolateurs avec console élastique au pylône 1

NOM	$T_{ini}$ (N)	$L_{ISO}$ (mm)	PLAQUE	$M_{max}$ 1 (Nm)	$M_{res}$ 2 (Nm)
A3-1	53.4	0	ACIER	69.7	36.2
A3-2	53.4	0	ACIER	69.2	S.O.
A4-1	53.4	25	ACIER	64.4	27.4
A4-2	53.4	25	ACIER	69.2	S.O.
A5-1	53.4	76	ACIER	70.7	17.5
A5-2	53.4	76	ACIER	72.7	S.O.

Tableau 3.6 Résultats des essais sur la variation de la longueur de la chaîne d'isolateurs avec console élastique au pylône 2

NOM	$T_{ini}$ (N)	$L_{ISO}$ (mm)	PLAQUE	$M_{max}$ 2 (Nm)	$M_{res}$ 2 (Nm)
A3-1	53.4	0	ACIER	45.5	15.7
A3-2	53.4	0	ACIER	47.7	S.O.
A4-1	53.4	25	ACIER	39.9	11.3
A4-2	53.4	25	ACIER	41.0	S.O.
A5-1	53.4	76	ACIER	32.1	69.7
A5-2	53.4	76	ACIER	30.4	5.2

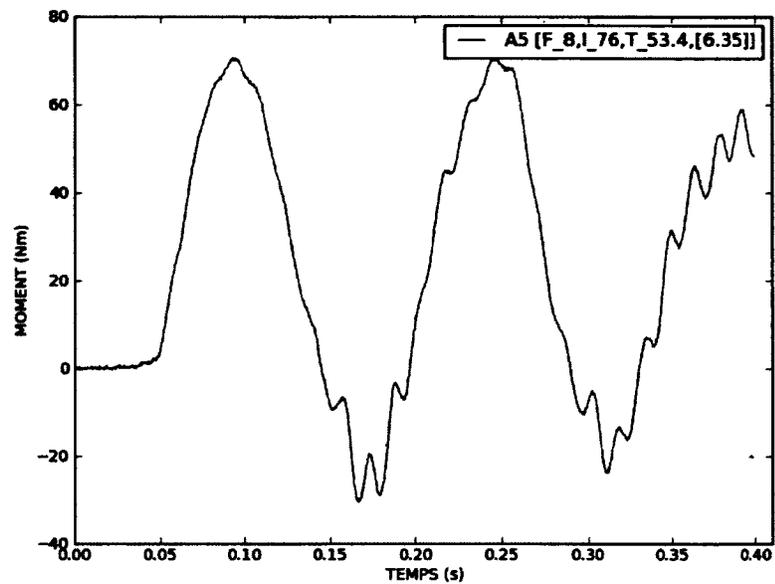


Figure 3.8 Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 1 pour l'essai A5-1

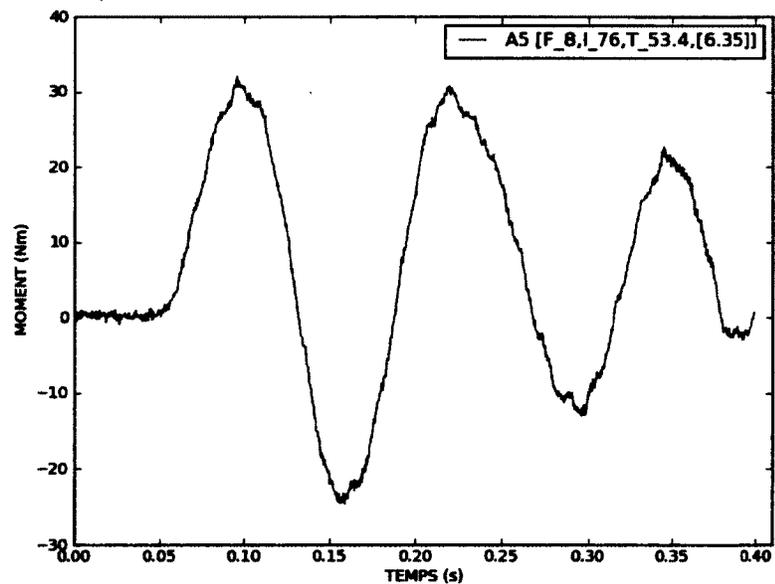


Figure 3.9 Exemple de réponse du moment, à la base du pylône 2 pour l'essai A5-1

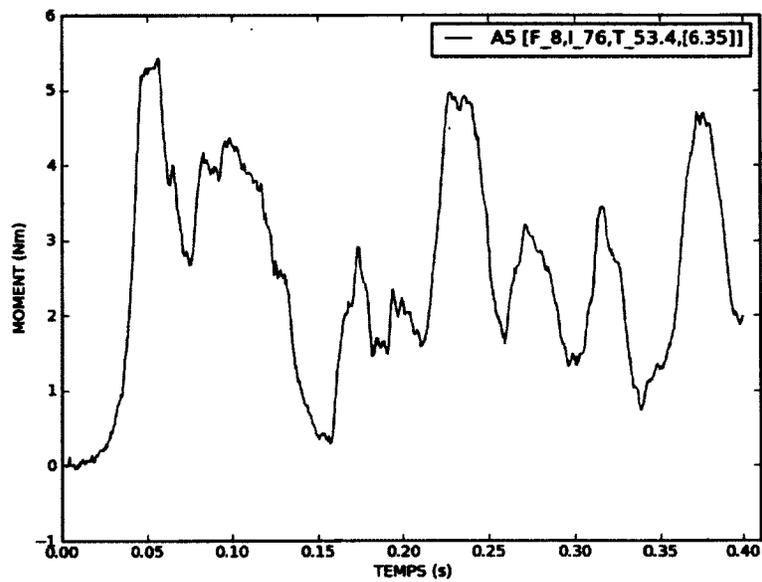


Figure 3.10 Exemple de réponse du moment, à la console du pylône 1 pour l'essai A5-1

### **3.1.2 Reproductibilité des essais**

Tous les essais effectués dans cette phase ont été réalisés en duplicata. L'objectif était de valider les différentes étapes de préparation du montage ainsi que la méthode de bris utilisée pour les essais. La reproductibilité des essais s'est présentée comme étant très satisfaisante avec et sans présence de chaînes d'isolateurs.

Les Tableaux 3.7 et 3.8 présentent un résumé des résultats obtenus lors des essais en phase élastique. Les résultats des divers essais élastiques présentent une bonne constance confirmant la fiabilité de la méthode de mise en flèche et de positionnement des chaînes d'isolateurs. L'écart type obtenu pour les différents essais démontre la bonne reproductibilité des résultats. La méthode de mise en place des conducteurs et d'exécution du bris permet donc d'obtenir des essais concordant entre les différents duplicatas.

Tableau 3.7 Moyennes et écarts types pour les essais avec console élastique au pylône 1

NOM	$T_{int}$ (N)	$L_{ISO}$ (mm)	PLAQUE	$M_{max}$ 1 (Nm)	MOYENNE PYL 1 (Nm)	ECART TYPE PYL 1 (Nm)
A1-1	17.8	0	ACIER	30.6	30.8	0.2
A1-2	17.8	0	ACIER	31.0	30.8	0.2
A2-1	35.6	0	ACIER	49.7	48.6	1.15
A2-2	35.6	0	ACIER	47.4	48.6	1.15
A3-1	53.4	0	ACIER	69.7	69.5	0.25
A3-2	53.4	0	ACIER	69.2	69.5	0.25
A4-1	53.4	25	ACIER	64.4	66.8	2.4
A4-2	53.4	25	ACIER	69.2	66.8	2.4
A5-1	53.4	76	ACIER	70.7	71.7	1.0
A5-2	53.4	76	ACIER	72.7	71.7	1.0
A6-1	17.8	0	ALU	28.0	30.1	2.1
A6-2	17.8	0	ALU	32.2	30.1	2.1
A7-1	35.6	0	ALU	-(*)	S.O.	S.O.
A7-2	35.6	0	ALU	32.6	S.O.	S.O.
A8-1	53.4	0	ALU	59.2	60.6	1.4
A8-2	53.4	0	ALU	62.0	60.6	1.4

Note : (\*) L'essai A7-1 a été retirée suite à un problème de mise en flèche.

Tableau 3.8 Moyennes et écarts types pour les essais avec console élastique au pylône 2

NOM	$T_{ini}$ (N)	$L_{ISO}$ (mm)	PLAQUE	$M_{max}$ 2 (Nm)	MOYENNE PYL 2 (Nm)	ECART TYPE PYL 2 (Nm)
A1-1	17.8	0	ACIER	17.3	17.45	0.15
A1-2	17.8	0	ACIER	17.6	17.45	0.15
A2-1	35.6	0	ACIER	33.4	31.9	1.55
A2-2	35.6	0	ACIER	30.3	31.9	1.55
A3-1	53.4	0	ACIER	45.5	46.6	1.1
A3-2	53.4	0	ACIER	47.7	46.6	1.1
A4-1	53.4	25	ACIER	39.9	40.5	0.6
A4-2	53.4	25	ACIER	41.0	40.5	0.6
A5-1	53.4	76	ACIER	32.1	31.25	0.85
A5-2	53.4	76	ACIER	30.4	31.25	0.85
A6-1	17.8	0	ALU	14.8	16.5	1.65
A6-2	17.8	0	ALU	18.1	16.5	1.65
A7-1	35.6	0	ALU	-(*)	S.O.	S.O.
A7-2	35.6	0	ALU	16.2	S.O.	S.O.
A8-1	53.4	0	ALU	41.4	42.3	0.85
A8-2	53.4	0	ALU	43.1	42.3	0.85

Note : (\*) L'essai A7-1 a été retirée suite à un problème de mise en flèche.

Plus en détail, les figures 3.11, 3.12 et 3.13 présentent différentes courbes de réponses pour une série de pylônes possédant une fréquence de 8 Hz sans chaînes d'isolateurs. La concordance entre les essais A3-1 et A3-2 y est bien représentée au niveau du contenu fréquentiel tant inférieurs que supérieurs.

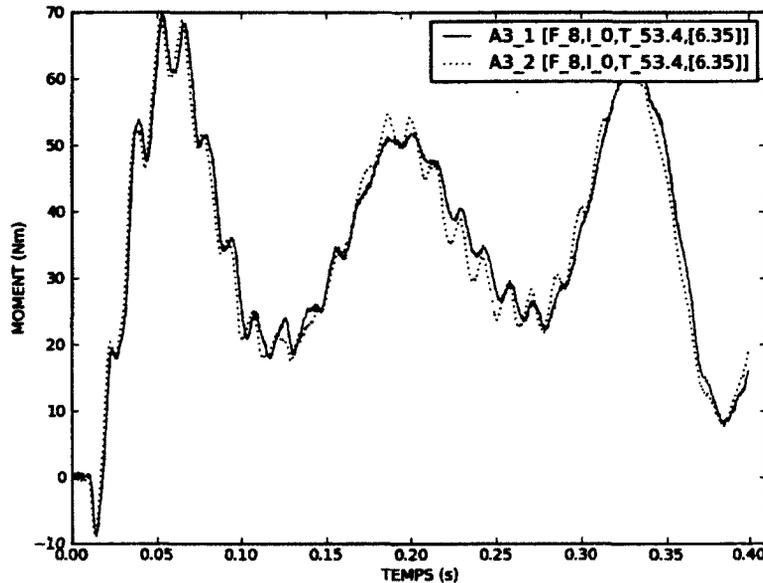


Figure 3.11 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a3-1 et a3-2 à la base

La Figure 3.14 présente le déplacement de la tête du pylône 1 mesuré par les capteurs laser. Les capteurs semblent avoir une certaine difficulté à mesurer les déplacements. Cette problématique provient du fait que l'installation des cibles sur les têtes des pylônes était trop flexible. En effet, un mouvement relatif entre la cible et le pylône a pu être observé par les vidéos obtenues par des caméras haute-vitesse, lors de certains essais.

Les mêmes observations ont pu être effectuées lors de l'analyse d'un système élastique avec présence de chaînes d'isolateurs. Les Figures 3.15, 3.16 et 3.17 présentent les résultats transitoires obtenus lors de ces essais. Par contre, lors de certains essais, les cibles sur le pylône 1 ne présentent pas de problème de flexibilité, ce qui offre un signal clair et consistant tel que présenté à la Figure 3.18. Puisque la consistance des résultats de déplacement ne peut être assurée entre les essais et que le déphasage n'est pas constant, les résultats des déplacements ne seront pas retenus comme paramètre de comparaison lors des analyses effectuées aux chapitres 4 et 5.

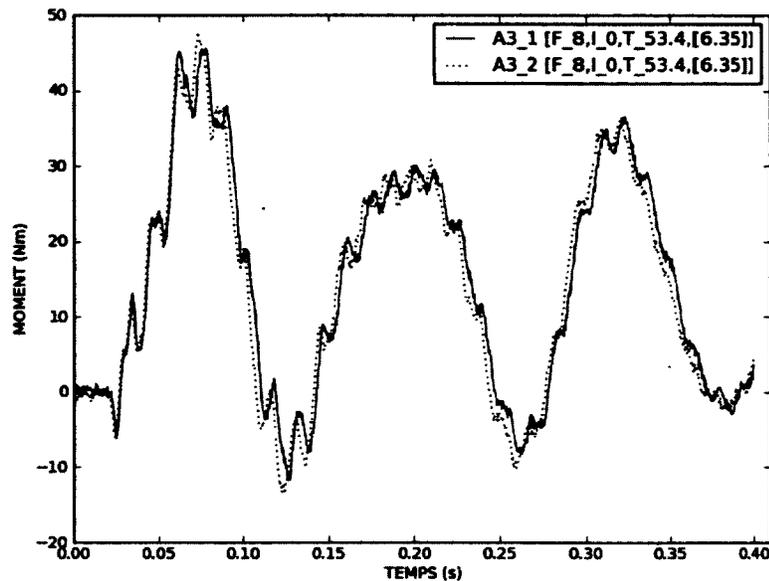


Figure 3.12 Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais a3-1 et a3-2 à la base

Les résultats obtenus lors des essais avec les plaques d'aluminium ont présenté une plus grande variabilité. Cette variabilité peut s'expliquer par la plus grande complexité de mise en flèche due à la grande flexibilité du pylône. En effet, chaque pylône étant plus flexible, le déplacement de chacune des têtes rendait les ajustements beaucoup plus complexes. Les tensions horizontales des portées n'étaient donc pas toujours balancées exactement. Dans la série A6, la différence entre les deux essais provient probablement de la tension initiale pouvant être plus élevée dans l'essai A6-2. La Figure 3.21 présente les résultats des moments à la console du pylône 1. Les résultats indiquent un moment à la console plus élevé à l'essai A6-2 qu'à l'essai A6-1 de plus, le décalage des efforts va dans ce sens. Toutefois, entre 30 ms et 80 ms, la tension dans le conducteur est dictée par la réponse inertielle du pylône 1 qui se déplace dans le même sens que le conducteur, créant un relâchement de la tension. Ceci explique la concordance des résultats durant cette période.

Les autres résultats comparatifs entre les duplicatas de cette série sont présentés aux figures 3.19, 3.20 et 3.21.

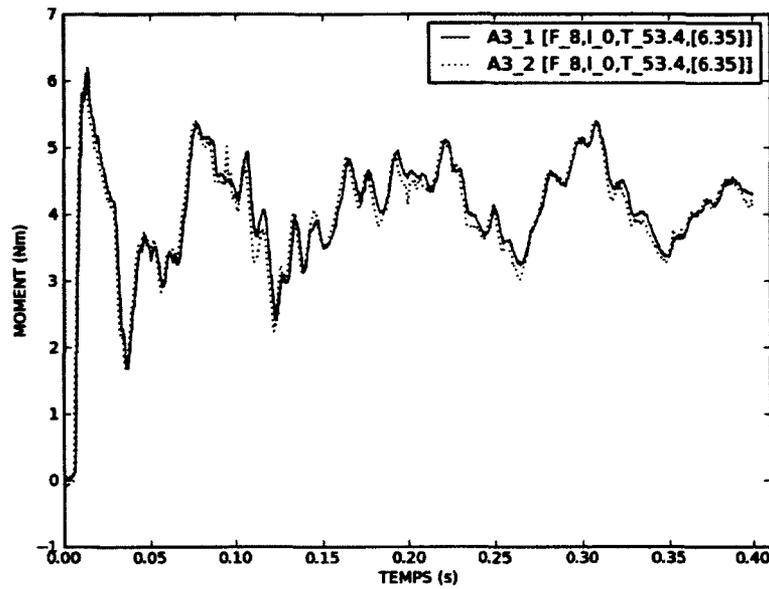


Figure 3.13 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a3-1 et a3-2 à la console

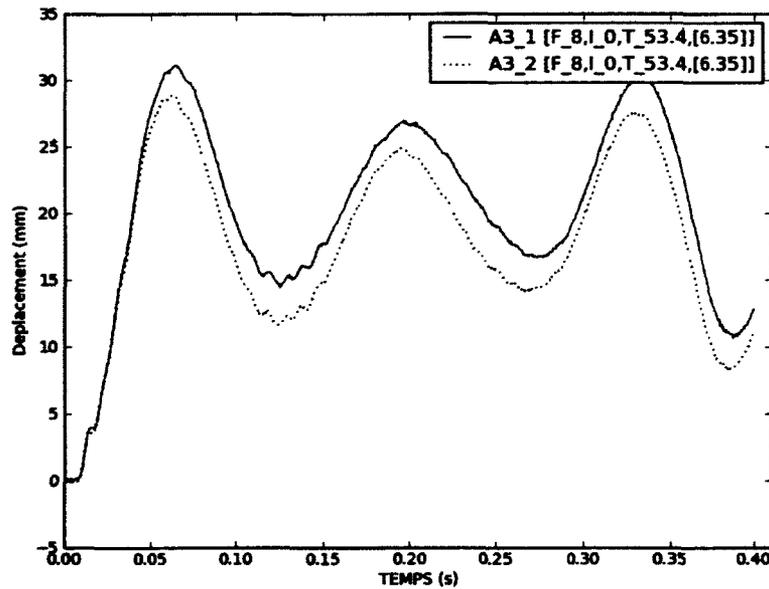


Figure 3.14 Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais a3-1 et a3-2 déplacement à la tête

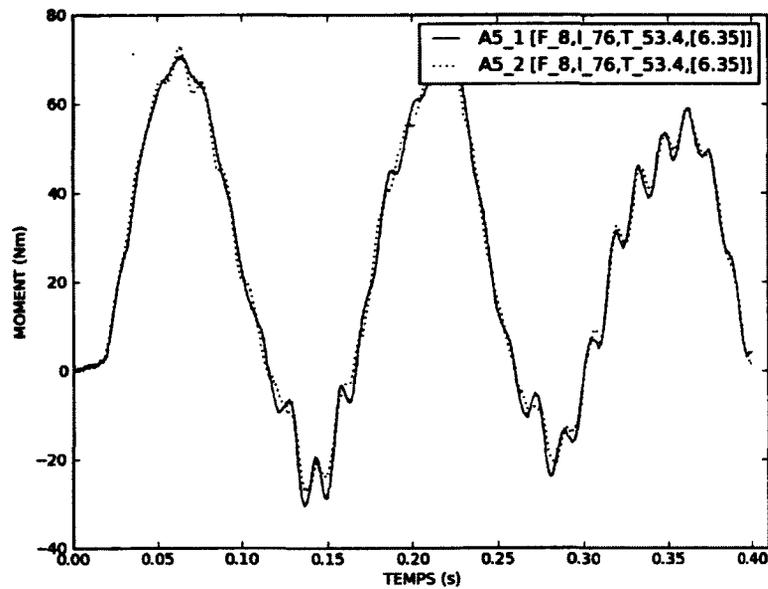


Figure 3.15 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a5-1 et a5-2 à la base

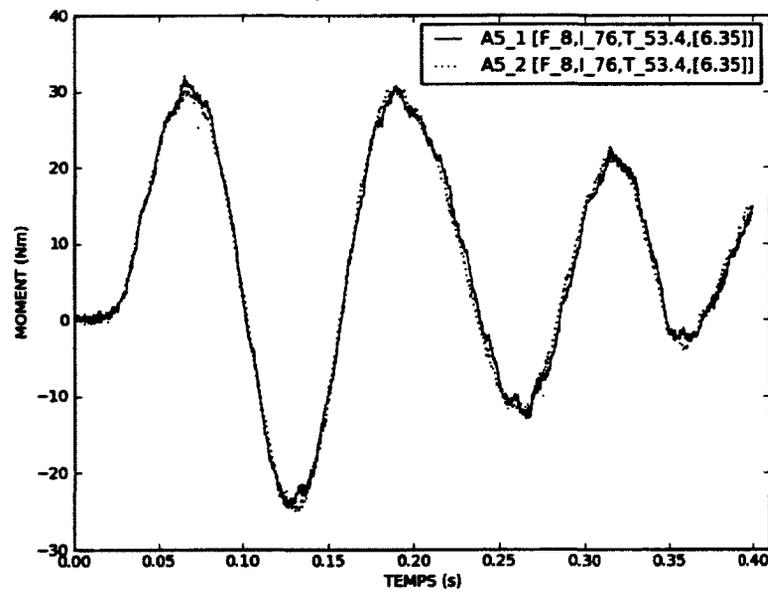


Figure 3.16 Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais a5-1 et a5-2 à la base

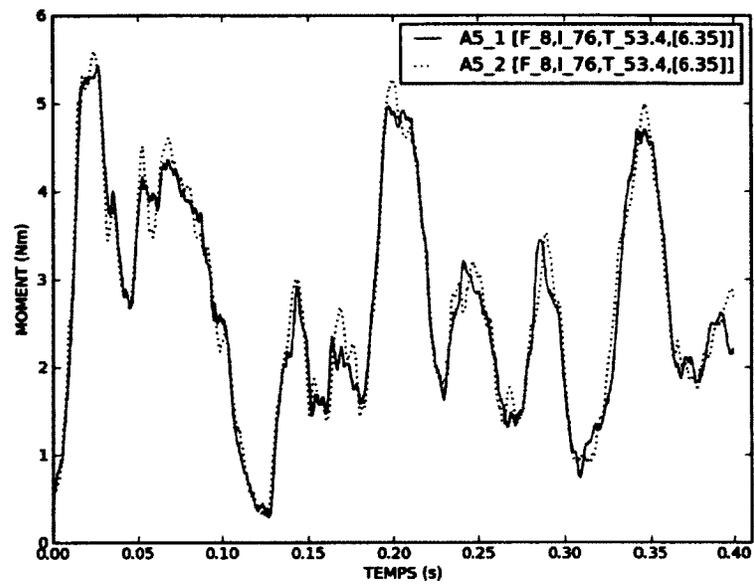


Figure 3.17 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a5-1 et a5-2 à la console

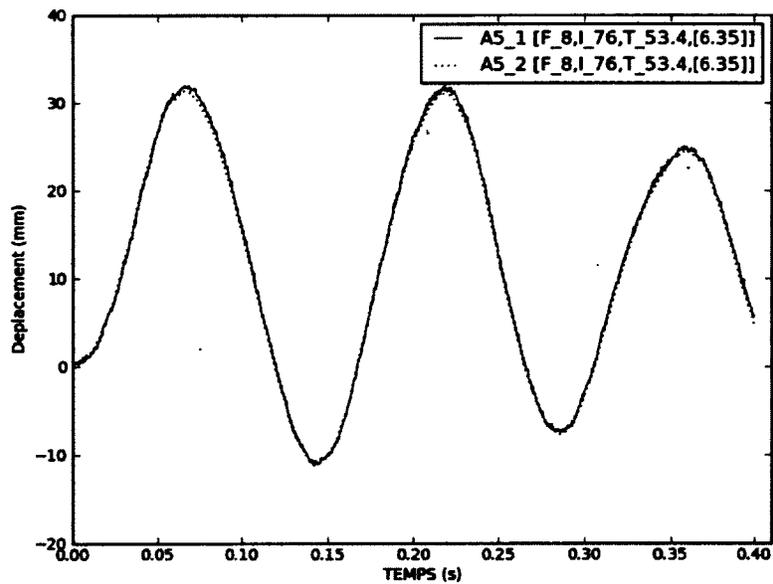


Figure 3.18 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a5-1 et a5-2 à la tête

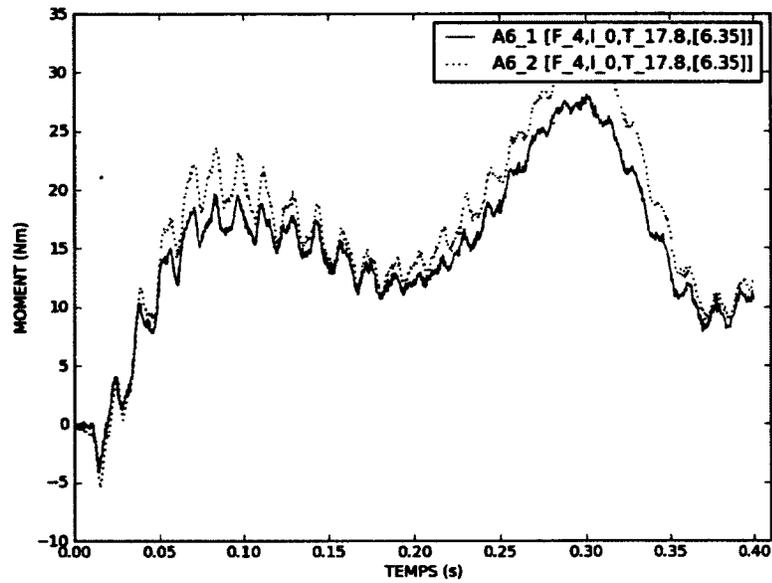


Figure 3.19 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a6-1 et a6-2 à la base du pylône 1

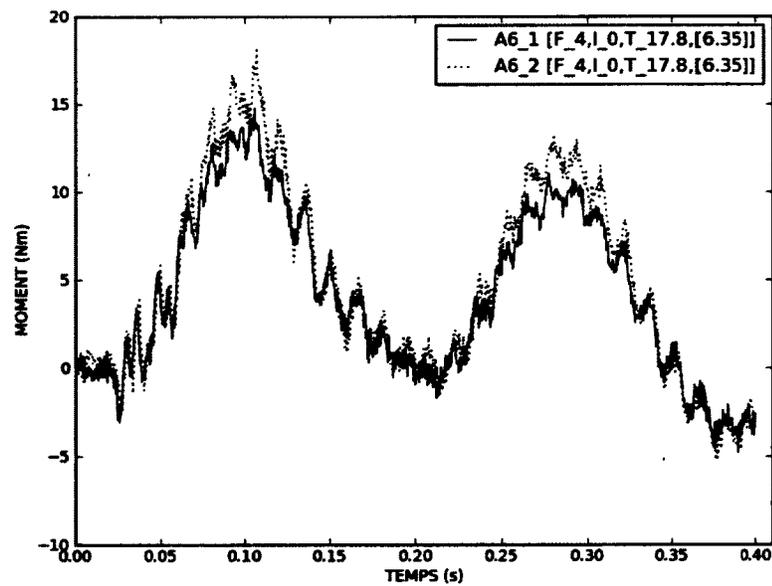


Figure 3.20 Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais a6-1 et a6-2 à la base du pylône 2

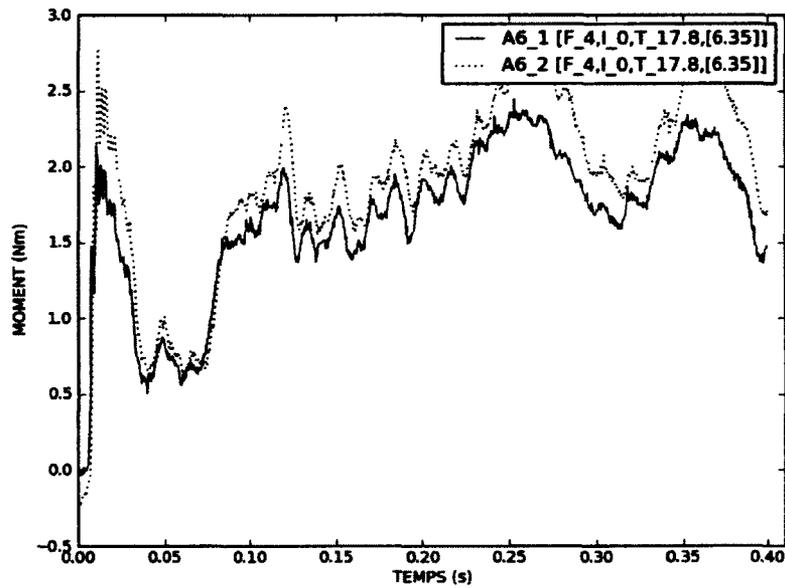


Figure 3.21 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a6-1 et a6-2 à la console du pylône 1

### **3.2 Essais avec fusible ductile à la console**

L'introduction d'un mécanisme ductile à la console a engendré une modification de la réponse dynamique du canton. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 3.9. En premier lieu, il est possible de constater la réduction du moment résiduel au pylône 1 provenant du relâchement du conducteur dans la première portée suite à la déformation de la console. Le relâchement de tension à la portée 1 augmente par le fait même le débalancement de tension au pylône 2, créant un moment résiduel plus important. En ce qui a trait au moment maximal, le moment au pylône 1 diminue avec l'ajout d'un mécanisme ductile et le moment maximal au pylône 2 augmente pour atteindre, avec un mécanisme très faible, le moment maximal sans mécanisme au pylône 1. Le détail de l'analyse de la réponse sera traité au chapitre 4.

Tableau 3.9 Résultats des essais avec fusible ductile à la console

NOM	TYPE	EP (mm)	L <sub>ISO</sub> (mm)	PLAQUE	M <sub>max</sub> 1 (Nm)	M <sub>max</sub> 2 (Nm)	M <sub>res</sub> 1 (Nm)	M <sub>res</sub> 2 (Nm)
A20-1	Ductile	0.81	0	ACIER	53.5	67.9	13.5	29.0
A21-1	Ductile	1.02	0	ACIER	47.0	68.6	13.3	27.7
A19-1	Ductile	1.27	0	ACIER	47.0	55.7	16.3	25.0
A22-1	Ductile	1.52	0	ACIER	47.8	51.8	19.6	23.9
A23-1	Ductile	1.78	0	ACIER	53.8	50.8	27.9	20.8
A18-1	Ductile	2.11	0	ACIER	65.5	42.9	35.8	15.0
A17-1	Ductile	2.59	0	ACIER	64.9	44.0	34.9	16.0
A3-1	Référence	6.35	0	ACIER	69.7	45.5	36.2	15.7
A3-2	Référence	6.35	0	ACIER	69.1	47.7	S.O.	S.O.
A26-1	Ductile	0.76	76	ACIER	54.1	63.4	9.8	9.1
A25-1	Ductile	1.27	76	ACIER	50.5	51.3	11.3	7.9
A27-1	Ductile	1.52	76	ACIER	59.0	42.0	12.7	7.0
A24-1	Ductile	1.78	76	ACIER	66.8	39.4	15.3	6.2
A5-1	Référence	6.35	76	ACIER	70.7	32.0	17.5	5.2
A5-2	Référence	6.35	76	ACIER	72.7	30.4	S.O.	S.O.

Les Figures 3.22, 3.23 et 3.24 présentent les courbes d'un essai avec mécanisme ductile à la console sans présence de chaîne d'isolateurs. La modification de la réponse à la base du pylône 1 se présente principalement à la première phase de la réponse. En effet, l'effort est grandement diminué par la déformation de la console. Par contre, tel que présenté à la Figure 3.23, les efforts à la première pointe au pylône 2 sont grandement augmentés. À la Figure 3.24, la courbe est modifiée entre 10 ms et 75 ms suite à la déformation de la console. Les résultats seront traités en détail au chapitre 4.

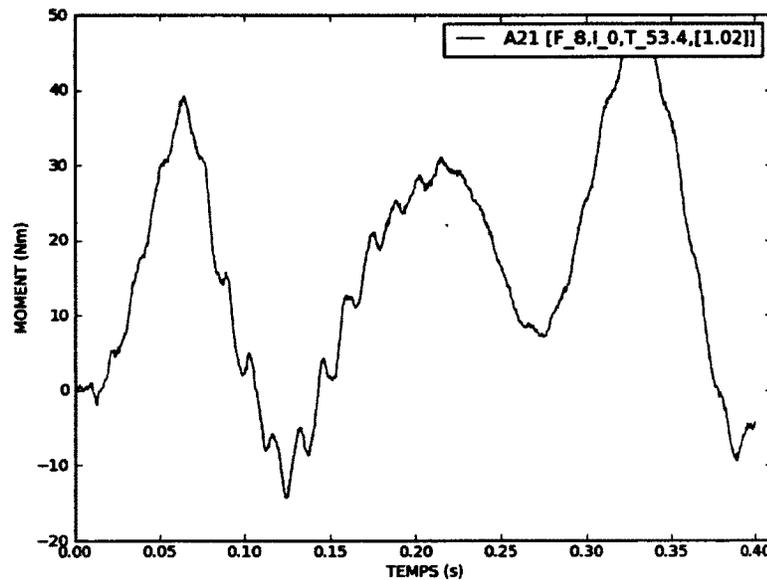


Figure 3.22 Réponse du pylône 1 entre les essais A21 à la base

Les Figures 3.25, 3.26 et 3.27 présentent les courbes d'un essais avec mécanisme ductile à la console avec présence de chaîne d'isolateurs. Les observations générales sur les réponses sans chaîne d'isolateur sont aussi applicables à la configuration avec chaîne d'isolateur.

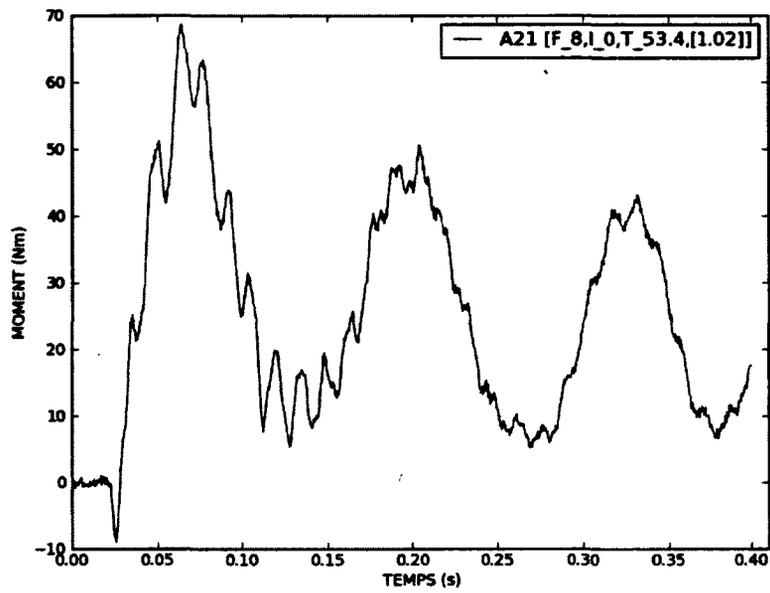


Figure 3.23 Réponse du pylône 2 entre les essais A21 à la base

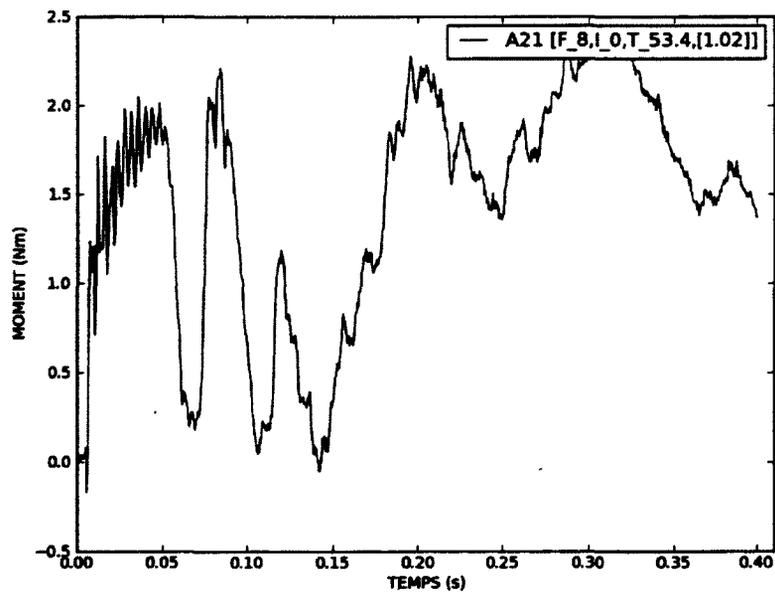


Figure 3.24 Réponse du pylône 1 entre les essais A21 à la console

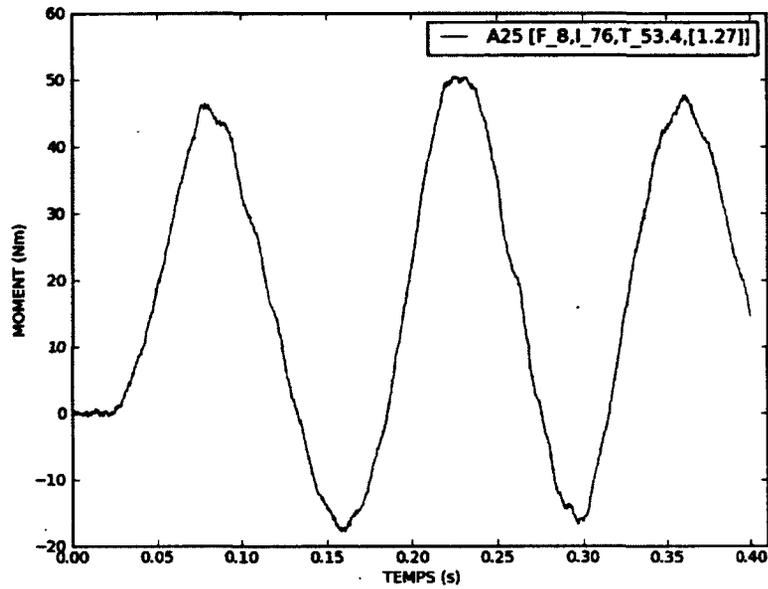


Figure 3.25 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais A25 à la base

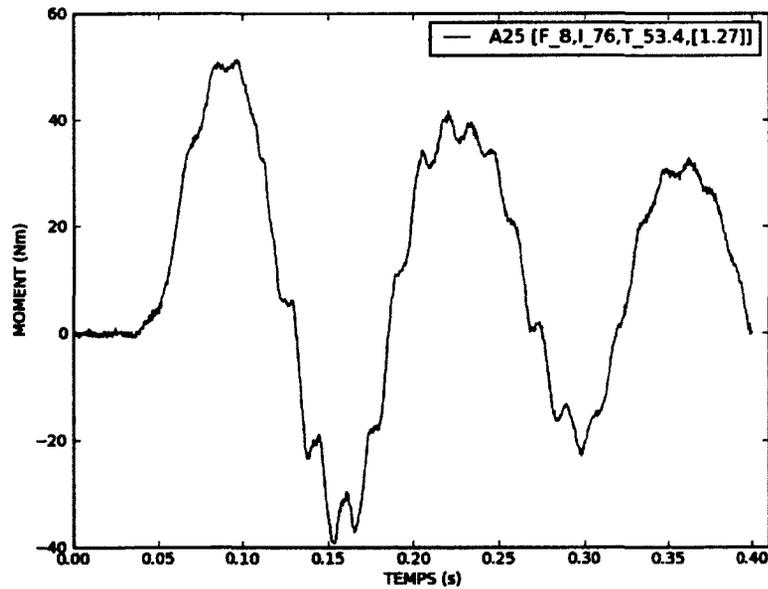


Figure 3.26 Comparaison de la réponse du pylône 2 entre les essais A25 à la base

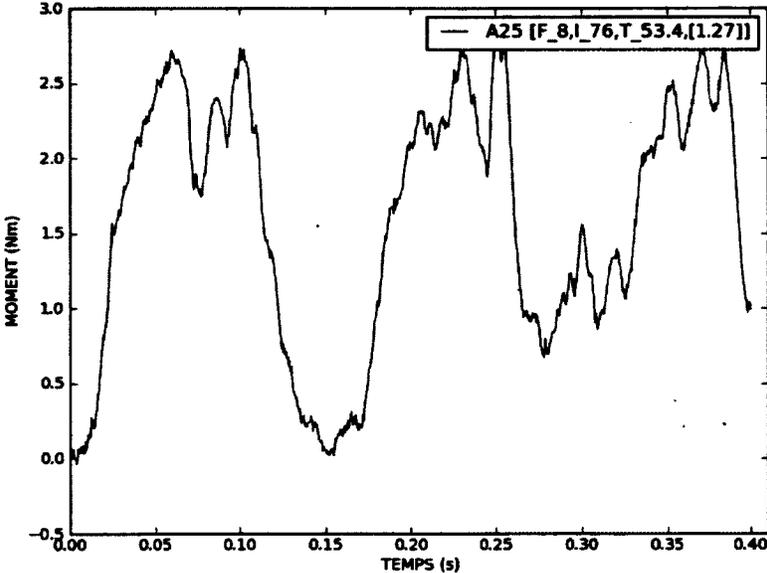


Figure 3.27 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais A25 à la console



# CHAPITRE 4

## ANALYSE DES RÉSULTATS

Le but du présent chapitre est d'analyser plus en profondeur les résultats présentés au chapitre 3.

### 4.1 Essais avec console sans dispositif fusible ductile

#### 4.1.1 Généralités observées sur la réponse dynamique du canton pour une tension de 53.4 N

Pour chacun des essais, deux ratios ont été calculés : le ratio du moment maximal sur le moment initial et celui du moment maximal sur le moment résiduel. Le Tableau 4.1 présente les ratios obtenus pour le pylône 1. Une étude statistique a été effectuée sur l'ensemble des données du projet ayant une tension initiale de 53.4 N. L'objectif étant de comparer statistiquement l'effet de la tension initiale et résiduelle en fonction des autres paramètres (longueur de chaîne d'isolateur et la rigidité du pylône), pour voir quel paramètre (tension initiale ou résiduelle) impactait le plus sur l'effort maximal du pylône. La valeur de 53.4 N a été retenue, car c'est à ce niveau de tension que le plus grand nombre d'essais ont été effectués. La moyenne du ratio moment maximum sur moment initial est de 1.03, l'écart type est de 0.07 pour un coefficient de variation de 7%. Pour le ratio du moment maximal sur le moment résiduel, la moyenne est de 2.6, l'écart type est de 0.89, pour un coefficient de variation de 34%. Il y a donc une forte corrélation à la tension initiale (moment initial) et ce, peu importe la configuration du canton. La tension initiale constituerait donc une base plus fiable dans l'étude d'un facteur d'impact dans la configuration sans dispositif fusible ductile à la console.

Les résultats de l'étude statistique au pylône 2 sont présentés au Tableau 4.2. En plus des ratios calculés au pylône 1, le ratio du moment maximal sur la différence entre le moment résiduel au pylône 1 et le moment résiduel au pylône 2 a été calculé. Tel qu'observé pour le pylône 1, le ratio du moment maximal sur moment résiduel pour le pylône 2 présente une grande dispersion avec une moyenne de 3.82, un écart type 1.31 pour un coefficient de variation de 34%. Contrairement au pylône 1, le ratio du moment maximal sur le moment initial au pylône 2 possède une dispersion importante avec une moyenne de 1.66,

Tableau 4.1 Résultats des essais avec pylône élastique et tension de 53.4N pour le pylône 1 en fonction de la tension initiale et de la tension résiduelle

NOM	$T_{ini}$ (N)	$L_{ISO}$ (mm)	PLAQUE	$M_{max}/M_{ini}$	$M_{max}/M_{res}$
A3-1	53.4	0	ACIER	1.07	1.93
A3-2	53.4	0	ACIER	1.06	1.91
A4-1	53.4	25	ACIER	0.99	2.35
A4-2	53.4	25	ACIER	1.06	2.53
A5-1	53.4	76	ACIER	1.08	4.04
A5-2	53.4	76	ACIER	1.11	4.15
A8-1	53.4	0	ALU	0.91	1.91
A8-2	53.4	0	ALU	0.95	2.00
Écart type				0.07	0.89
Moyenne				1.03	2.6
Coeff. Variation				7 %	34 %

un écart-type de 0.26 pour un coefficient de variation 16%, laissant croire une moins bonne corrélation du moment maximal avec la tension initiale. Par contre, le ratio du moment maximal sur la différence entre le moment résiduel au pylône 1 et le moment résiduel au pylône 2 présente une moyenne de 2.52, un écart-type de 0.18 pour un coefficient de variation de 7%.

Tableau 4.2 Résultats des essais avec pylône élastique et tension de 53.4N pour le pylône 2 en fonction de la tension initiale et de la tension résiduelle

NOM	TENSION (N)	L ISO (mm)	PLAQUE	$M_{max}/M_{ini}$	$M_{max}/M_{res}$	$M_{max}/M_{diff}$ (1)
A3-1	53.4	0	ACIER	1.44	2.90	2.22
A3-2	53.4	0	ACIER	1.37	3.04	2.33
A4-1	53.4	25	ACIER	1.64	3.53	2.48
A4-2	53.4	25	ACIER	1.59	3.63	2.55
A5-1	53.4	76	ACIER	2.03	6.17	2.61
A5-2	53.4	76	ACIER	2.15	5.85	2.47
A8-1	53.4	0	ALU	1.58	2.65	2.69
A8-2	53.4	0	ALU	1.52	2.76	2.80
Écart type				0.26	1.31	0.18
Moyenne				1.66	3.82	2.52
Coeff. Variation				16 %	34 %	7 %

(1)  $M_{diff}$  :  $M_{res}$  au pylône 1 -  $M_{res}$  au pylône 2, après stabilisation du canton

#### 4.1.2 Effet de la fréquence de la structure

Le Tableau 4.3 présente les résultats expérimentaux pour les essais A1 à A3 et A6 à A8. Ce tableau compare la réponse de cantons composés de pylônes ayant une fréquence de 8

Hz et de pylônes ayant une fréquence de 4 Hz. Les résultats démontrent que pour toutes les tensions, les pylônes plus rigides reprennent plus d'efforts. Les différences entre les moments maximaux pour les deux configurations varient de 2 à 13% en fonction de la tension initiale. Cet effet est maximum pour les tensions élevées.

Tableau 4.3 Comparaison des efforts à la base des pylônes 1 et 2 en fonction de la fréquence des pylônes

$T_{ini}$ (N)	ALU [5Hz]			ACIER [8Hz]			Ratio des efforts	
	Essai	$M_{max}$ P1 (Nm)	$M_{max}$ P2 (Nm)	Essai	$M_{max}$ P1 (Nm)	$M_{max}$ P2 (Nm)	P1	P2)
17.8	A6	30.1	16.4	A1	30.8	17.4	0.98	0.94
35.6	A7	45.2	28.6	A2	48.5	31.9	0.93	0.90
53.4	A8	60.6	42.2	A3	69.4	46.6	0.87	0.91

La Figure 4.1 présente la comparaison des réponses transitoires du pylône 1 pour une tension de 53.4N sous deux rigidités. Ces figures démontrent que, pour cette configuration de canton, la réduction apportée par une rigidité plus faible est principalement observable lors de la première pointe suivant le bris. La valeur de la pointe au pylône 1 passe donc de 69.4Nm à 54.5Nm pour une réduction de 21% à la première pointe. La Figure 4.2 présente des analyses fréquentielles de la réponse de l'essai A3-1 et A8-1, on peut percevoir la différence de fréquence du premier mode des deux pylônes.

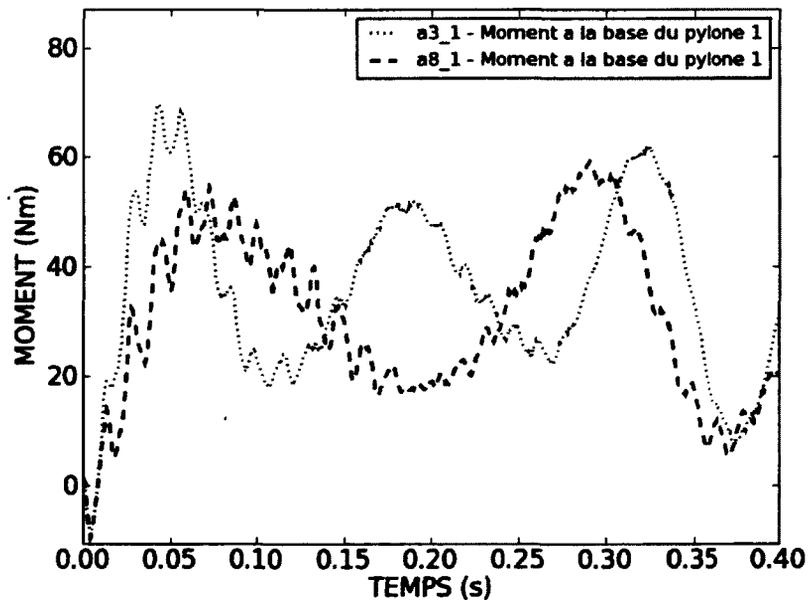


Figure 4.1 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a3-1 et a8-1 à la base

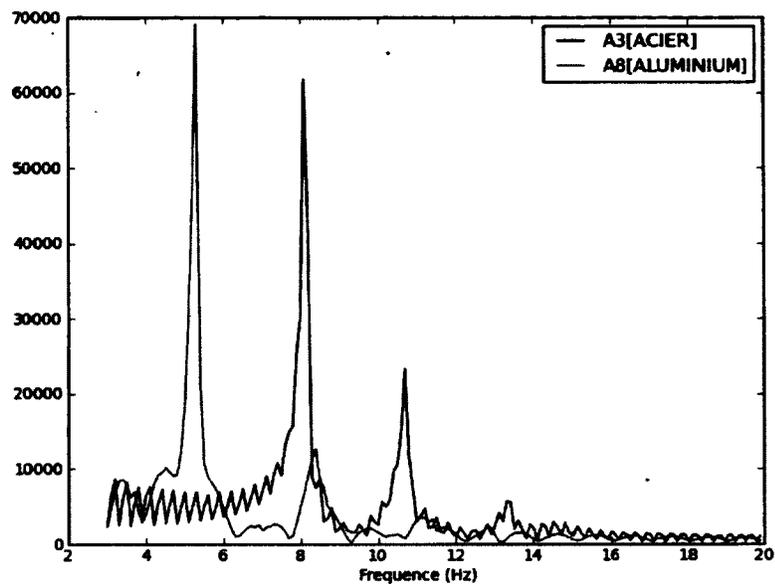


Figure 4.2 Analyses fréquentielles des réponses au essais A3-1 et A8-1

La Figure 4.3 présente la réponse à la console du pylône 1 avec une fréquence de 8Hz et de 5Hz. Cette figure démontre que la modification de la rigidité du pylône n'a pas d'effet sur la première pointe de traction du conducteur.

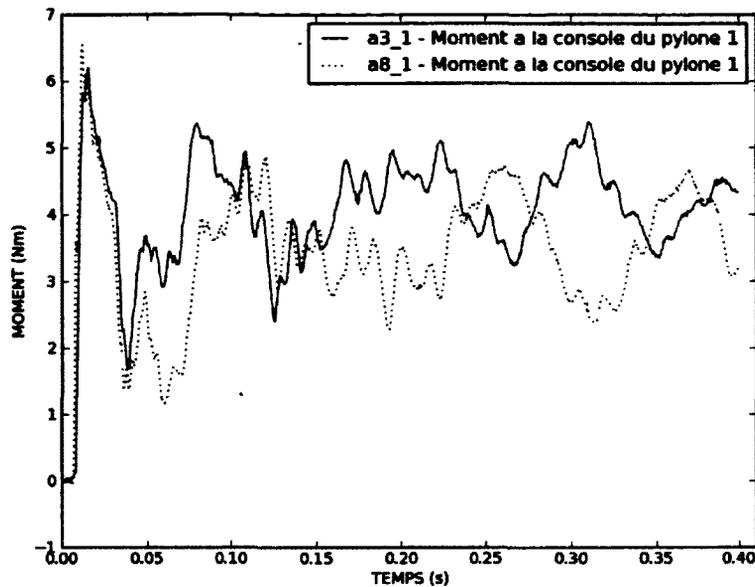


Figure 4.3 Comparaison de la réponse du pylône 1 entre les essais a3-1 et a8-1 à la console

### 4.1.3 Effet de la longueur des chaînes d'isolateurs

Le Tableau 4.4 présente les résultats obtenus lors d'essais faisant varier la longueur des chaînes d'isolateurs. Les résultats démontrent que le moment maximum à la base observé au pylône 1 n'est que faiblement dépendant de la longueur de la chaîne. La réduction maximal des efforts en présence de chaîne d'isolateurs est de 7%. Par contre, les moments à la base au pylône 2 sont grandement réduits par l'ajout d'une chaîne d'isolateurs. À longueur maximum, la réduction des efforts est de 33%. Évidemment, l'ajout d'une chaîne d'isolateurs crée un relâchement dans le canton après le bris, réduisant par le fait même la tension résiduelle pour les deux pylônes. Par exemple, la tension résiduelle entre le cas sans chaînes d'isolateurs et le cas avec une longueur de chaînes de 76 mm présente une réduction de l'ordre de 52% au pylône 1 et 67% au pylône 2. La Figure 4.4 présente les réponses transitoires au pylône 1 obtenues pour les trois longueurs de chaînes d'isolateurs. La Figure 4.5 présente celles pour le pylône 2.

Les moments maximaux étant sensiblement les mêmes, les valeurs des moments dynamiques se voient donc grandement augmentés au pylône 1. La Figure 4.7 présente la tension résiduelle ainsi que les efforts dynamiques maximaux obtenus pour les différentes longueurs de chaînes aux pylônes 1 et 2. Au pylône 1, les résultats démontrent que l'ajout d'une chaîne d'isolateurs modifie l'apport dynamique dans la première pointe des efforts

Tableau 4.4 Comparaison des efforts en fonction de la longueur de la chaîne d'isolateurs

Propriétés		$M_{max}$ base (Nm)		Ratio $M_{Lisol}/M_{sansiso}$	
Essai	$L_{ISO}$ (mm)	PYL 1 (Nm)	PYL 2 (Nm)	PYL 1 (Nm)	PYL 2 (Nm)
A3	0	69.4	46.6	1.00	1.00
A4	25	66.8	40.4	0.96	0.87
A5	76	71.7	31.3	1.03	0.67

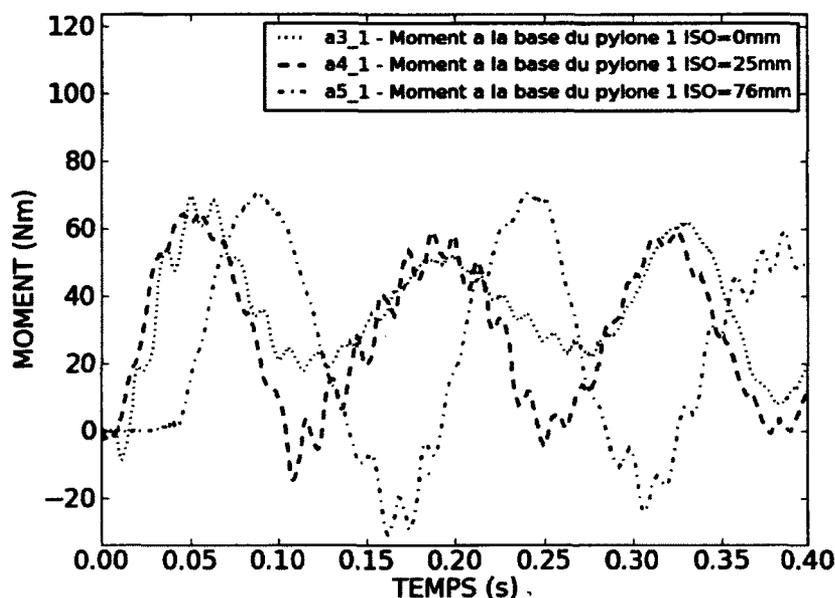


Figure 4.4 Comparaison de la réponse du pylône 1 en fonction de la longueur des chaînes d'isolateurs

obtenus à la base du pylône 1. L'augmentation de l'apport dynamique est de l'ordre de 60% pour le pylône 1. Par contre, au pylône 2, la partie dynamique des efforts ne semble pas significativement affectée par la longueur de chaînes d'isolateurs.

La Figure 4.8 présente la réponse transitoire à la console du pylône 1 pour les cas A3-1(sans chaîne) et A5-1(avec chaîne). L'augmentation du moment dynamique au pylône 1 semble provenir de l'effet pendule de la chaîne. Le balancement de la chaîne retarde la première pointe dynamique et permet donc le couplage à la seconde pointe de traction, tel qu'observé entre les instants 40 ms et 130 ms. En résumé, malgré la diminution des efforts résiduels, l'augmentation des efforts dynamiques permet d'obtenir un moment maximum sensiblement équivalent à celui observé sans chaînes d'isolateurs.

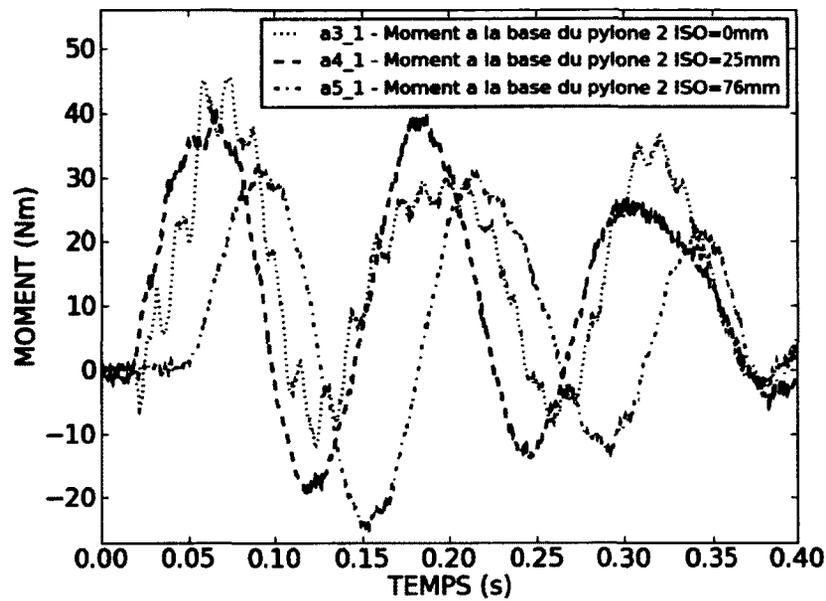


Figure 4.5 Comparaison de la réponse du pylône 2 en fonction de la longueur des chaînes d'isolateurs

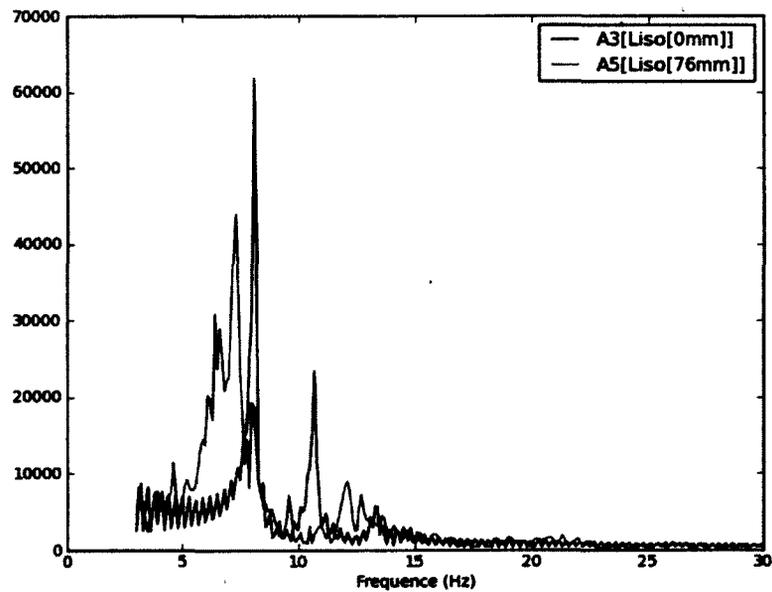


Figure 4.6 Analyses fréquentielles des réponses au essais A3-1 et A5-1

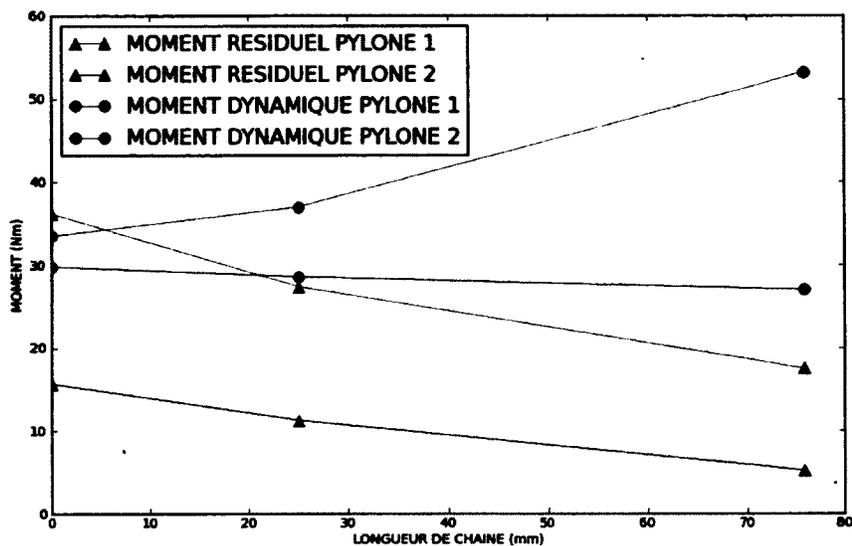


Figure 4.7 Comparaison des moments résiduels et dynamiques maximaux en fonction des longueurs de chaînes d'isolateurs

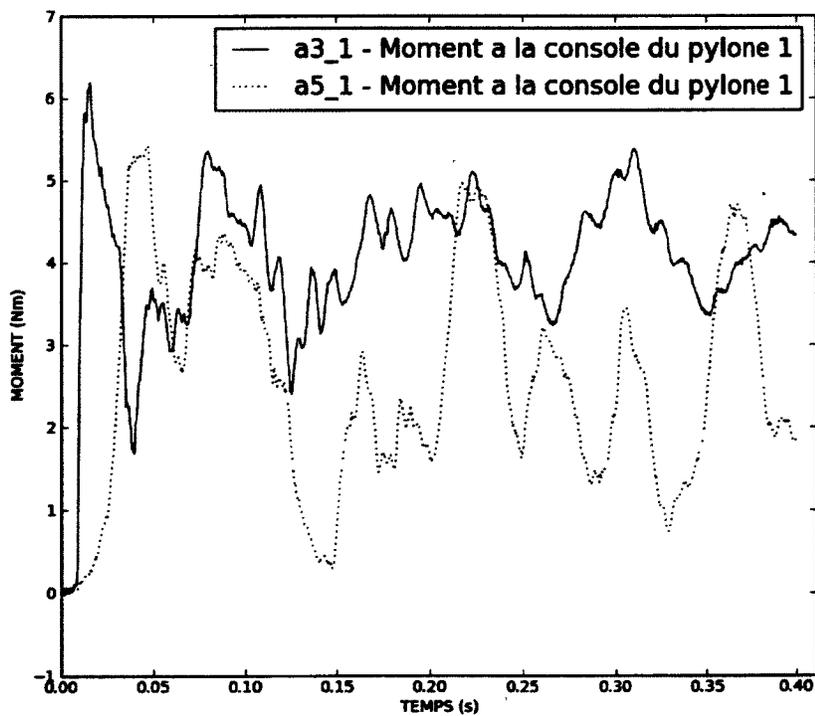


Figure 4.8 Réponse dynamique transitoire à la console du pylône 1 pour les cas a3-1 et a5-1

## **4.2 Essais avec fusible ductile à la console**

L'introduction d'un mécanisme ductile à la console du premier pylône suivant le bris a engendré une modification de la réponse du canton lors de bris de conducteurs. Les efforts obtenus sont résumés au Tableau 4.5. De manière générale, les efforts à la base du pylône 1 ont diminué en la présence d'un mécanisme pour atteindre une réduction allant jusqu'à 31%. En contrepartie, les efforts au pylône 2 ont subi une augmentation pouvant atteindre 98%. Les sections suivantes font l'analyse détaillée de l'effet et du comportement d'un fusible ductile à la console en fonction de ses propriétés.

Tableau 4.5 Résultats des essais avec fusible ductile à la console

NOM	TYPE	EP (mm)	L <sub>ISO</sub> (mm)	PLAQUE	M <sub>max</sub> PYL 1 (Nm)	M <sub>max</sub> PYL 2 (Nm)	M <sub>max</sub> /M <sub>max</sub> référence
A20-1	Ductile	0.81	0	ACIER	53.5	67.9	0.98
A21-1	Ductile	1.02	0	ACIER	47.0	68.6	0.99
A19-1	Ductile	1.27	0	ACIER	47.0	55.7	0.80
A22-1	Ductile	1.52	0	ACIER	47.8	51.8	0.74
A23-1	Ductile	1.78	0	ACIER	53.8	50.8	0.78
A18-1	Ductile	2.11	0	ACIER	65.5	42.9	0.94
A17-1	Ductile	2.59	0	ACIER	64.9	44.0	0.94
A3-1	Référence	6.35	0	ACIER	69.7	45.5	S.O.
A3-2	Référence	6.35	0	ACIER	69.1	47.7	S.O.
A26-1	Ductile	0.76	76	ACIER	54.1	63.4	0.88
A25-1	Ductile	1.27	76	ACIER	50.5	51.3	0.72
A27-1	Ductile	1.52	76	ACIER	59.0	42.0	0.82
A24-1	Ductile	1.78	76	ACIER	66.8	39.4	0.93
A5-1	Référence	6.35	76	ACIER	70.7	32.0	S.O.
A5-2	Référence	6.35	76	ACIER	72.7	30.4	S.O.

### 4.2.1 Effet global de modification des efforts

Pour évaluer l'effet global sur le canton, un ratio a été calculé entre le moment maximal au pylône 1 ou 2 et le moment maximal sans entaille au pylône 1. L'ajout de l'entaille a permis de contrôler la ductilité ajoutée. L'objectif de ce ratio est de qualifier la réduction globale de l'effort maximal pour un canton. Ce ratio est présenté au Tableau 4.5. La Figure 4.9 présente la courbe des ratios des moments maximaux, pour le pylône 1 seulement, en fonction de l'épaisseur de la section du fusible. Sur la courbe, il est possible d'observer une faible diminution des efforts en fonction de la réduction de la section, jusqu'à l'atteinte d'un point de changement de pente situé à 2.11 mm pour la configuration sans chaînes d'isolateurs et 1.52 mm pour la configuration avec chaîne d'isolateurs.

La Figure 4.10 présente le ratio des moments maximaux au pylône 2 sur le moment de référence au pylône 1. Sur cette figure, les épaisseurs identifiées précédemment coïncident avec un changement marqué de la réponse du pylône 2. En deçà de ces épaisseurs, les efforts au pylône 2 augmentent rapidement avec la diminution de la section de la console. La Figure 4.11 présente les ratios basés sur les pylônes 1 et 2 en fonction de l'épaisseur de la console. Ces courbes présentent, pour les cas avec et sans chaînes d'isolateurs, une configuration optimale où l'effet du mécanisme présent à la console du pylône 1 permet une réduction importante, sans l'augmentation des efforts au pylône 2. L'analyse des ratios individuels permet de constater que l'épaisseur optimale à l'entaille est atteinte lorsque les valeurs du moment maximal aux pylônes 1 et 2 est la même.

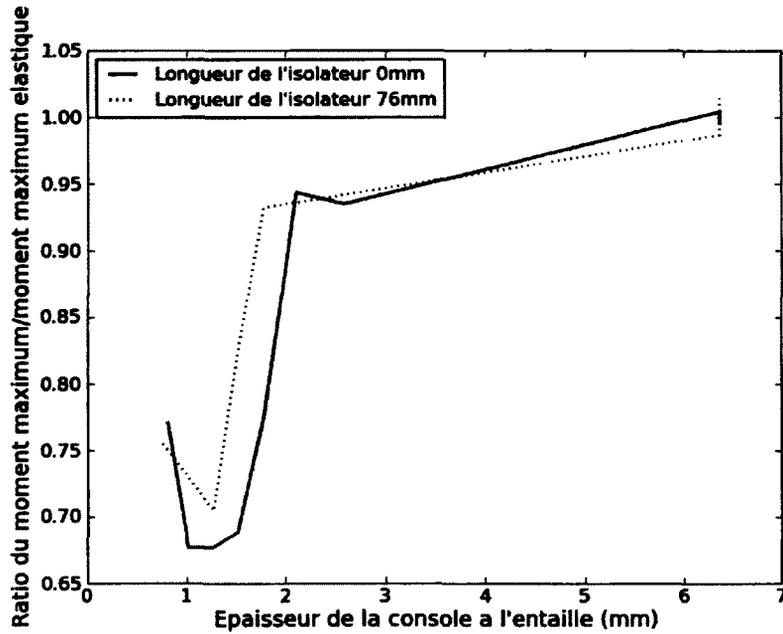


Figure 4.9 Courbe de ratio des moments à la base du pylône 1 en fonction de la dimension de la section du fusible

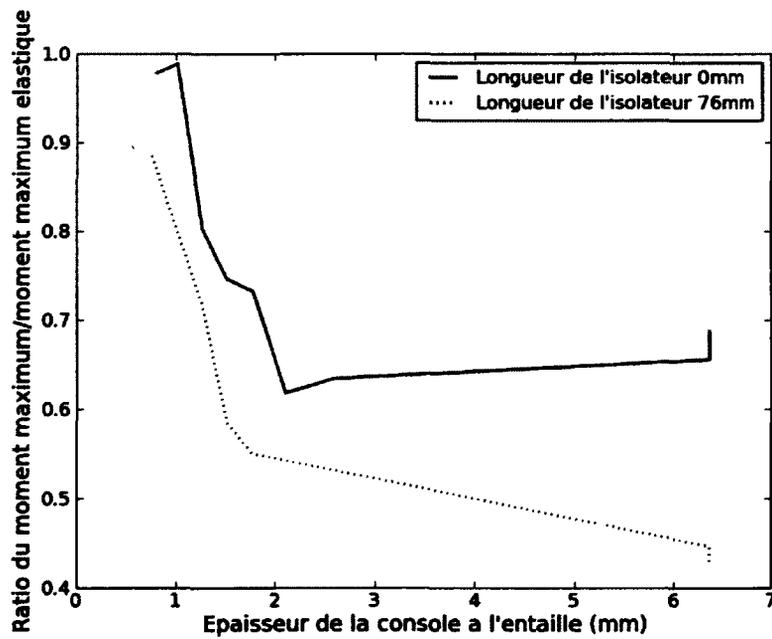


Figure 4.10 Courbe de ratio des moments à la base du pylône 2 en fonction de la dimension de la section du fusible

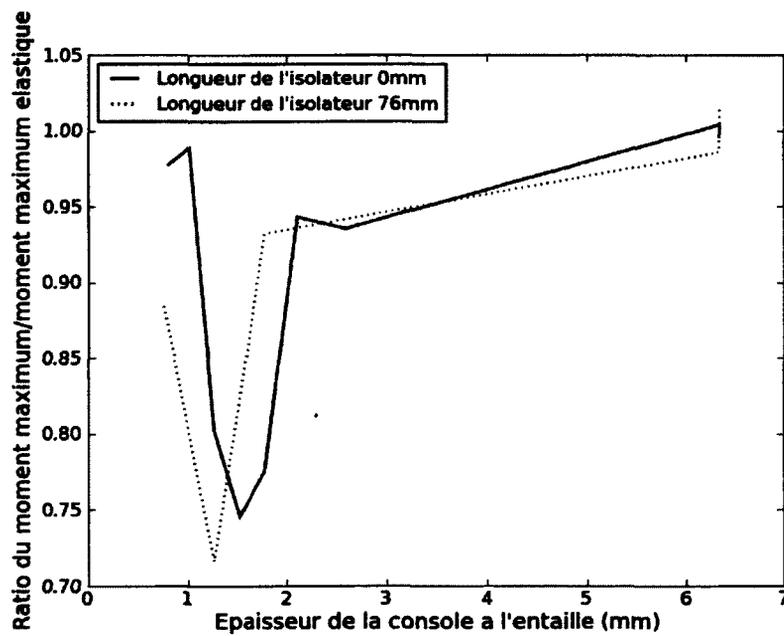


Figure 4.11 Courbe de ratio des moments du système en fonction de la dimension de la section du fusible

### 4.2.2 Mécanisme de réponse de la console modifiée

Le comportement du mécanisme aux pylônes peut être divisé en trois domaines. La figure 4.12 présente les points de changement de phase. Le domaine un est situé entre le comportement élastique et le point de chute des efforts au pylône 1. Par la suite, les efforts au pylône 1 décroît et ceux du pylône 2 croît jusqu'à l'atteinte du début du domaine 3. À ce moment les efforts au pylône 1 réaugmentent.

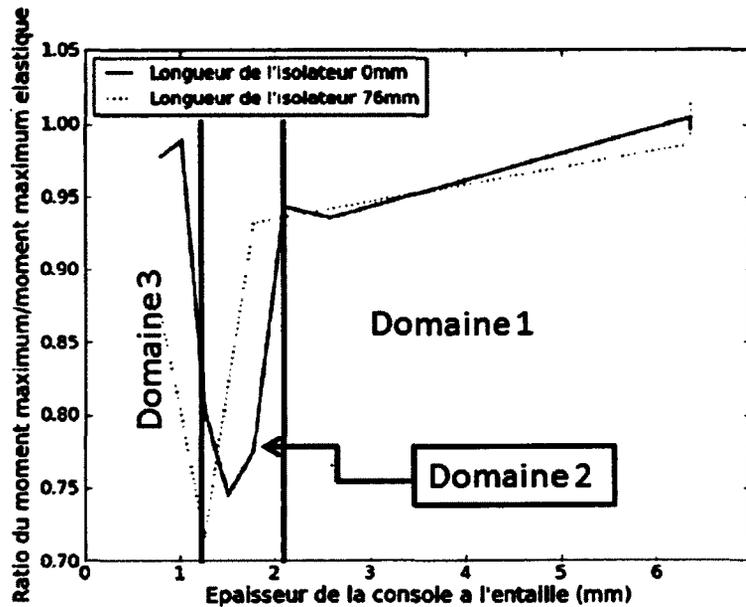


Figure 4.12 Domaine de réponse en présence d'un mécanisme à la console

#### Mécanisme de réponse du Domaine 1

La réduction des efforts observée dans le domaine 1 est majoritairement attribuable au comportement du pylône 1. C'est pourquoi seul le pylône 1 sera étudié dans l'analyse de ce domaine. La Figure 4.13 présente les efforts transitoires à la base du pylône 1 pour les épaisseurs de la console du domaine 1. Sur cette courbe, il est possible d'observer que le comportement n'est que très faiblement modifié par la réduction de la section. La réduction des efforts provient principalement de l'expression du second mode du pylône 1 qui s'atténue avec la diminution de l'épaisseur de la console. Cela se traduit par l'atténuation des pointes secondaires qui étaient perceptibles sur la crête du premier pic principal de la courbe de référence. La participation du premier mode reste toutefois très similaire entre les trois essais.

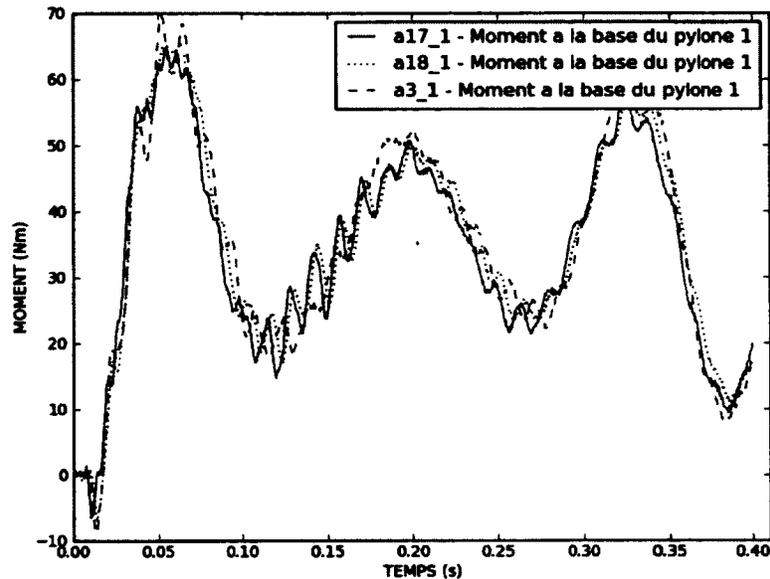


Figure 4.13 Efforts à la base du pylône 1 pour les essais A17, A18 et A3

La Figure 4.14 présente les efforts à la console pour les cas A17[2.59mm], A18[2.11mm] et A3[6.35mm]. À première vue, les trois courbes montrent une réponse similaire. La Figure 4.15, présente un agrandissement des 100 premières millisecondes. Il est possible d'observer que les consoles comportant un mécanisme ductile répondent différemment en coupant la première pointe à un niveau d'effort légèrement inférieur. Afin d'évaluer l'effet de la disparition de cette pointe, un calcul de réponse à une impulsion peut être effectué. L'équation 4.1 [CLOUGH et PENZIEN, 2003] représente l'amplification dynamique des déplacements pour une charge impulsive sous forme de sinus.

$$R(\alpha) = \left[ \frac{1}{(1 - \beta^2)} \right] \left[ \sin \pi \alpha - \beta \sin \frac{\pi \alpha}{\beta} \right] \text{ pour } 0 < \alpha < 1$$

$$R_{max} = \left[ (1 - \cos 2\pi(t_1/T))^2 + (\sin 2\pi(t_1/T))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ pour } \alpha > 1$$

$$\alpha = \frac{t}{t_1}$$

$$\beta = \frac{T}{2 * t_1} \quad (4.1)$$

$T$  = Période du système

$t_1$  = Durée du demi-sinus

$t$  = Temps du chargement

La Figure 4.16 présente la période utilisée pour le calcul de la durée de chargement de l'effort supplémentaire de pointe du cas de référence A3[6.35mm]. La durée du chargement est de 7.8 ms. L'estimation de la période du deuxième mode du pylône est présentée à la Figure 4.17. La période utilisée pour le calcul est de 13.5 ms. La période du pylône est de 125 ms ( $f = 8$  Hz). Le calcul de la réponse d'amplification des déplacements montre que le premier mode obtient une amplification de 0.24 et le deuxième mode, une amplification de 1.65. Cela explique la présence accrue de la participation du deuxième mode dans la réponse du cas de référence. Cela explique aussi la faible diminution du moment maximal, car la majorité de la réponse est attribuable à l'expression du premier mode qui n'est que faiblement affecté par la disparition de cette pointe. La comparaison des moments résiduels présentés au Tableau 4.6 ne montre pas de différence notable entre les trois configurations. Cela confirme qu'aucun relâchement significatif n'a pas été causé par une plastification importante de la console.

À la lumière des résultats obtenus, il est impossible de confirmer la raison de l'atténuation du premier pic. Il est toutefois plausible d'attribuer ce phénomène à la légère plastification du fusible ou encore à la diminution de la rigidité de la console. L'effort de traction des conducteurs obtenu lors de cet essai crée un moment à la section réduite supérieur à la capacité élastique de la console. Cependant, la réduction de la section permet aussi une plus grande flexibilité de la console. De ce fait, les deux phénomènes sont donc plausibles, mais les résultats de laboratoire ne permettent pas de séparer ces deux phénomènes.

Tableau 4.6 Moments maximaux et résiduels pour les pylônes du domaine 1

NOM	ÉPAISSEUR (mm)	$M_{max}$ PYL 1 (Nm)	$M_{res}$ PYL 1 (Nm)	$M_{res}$ PYL 2 (Nm)
A3-1	6.35	69.7	36.2	16
A17-1	2.59	64.9	34.9	16
A18-1	2.11	65.5	35.8	15

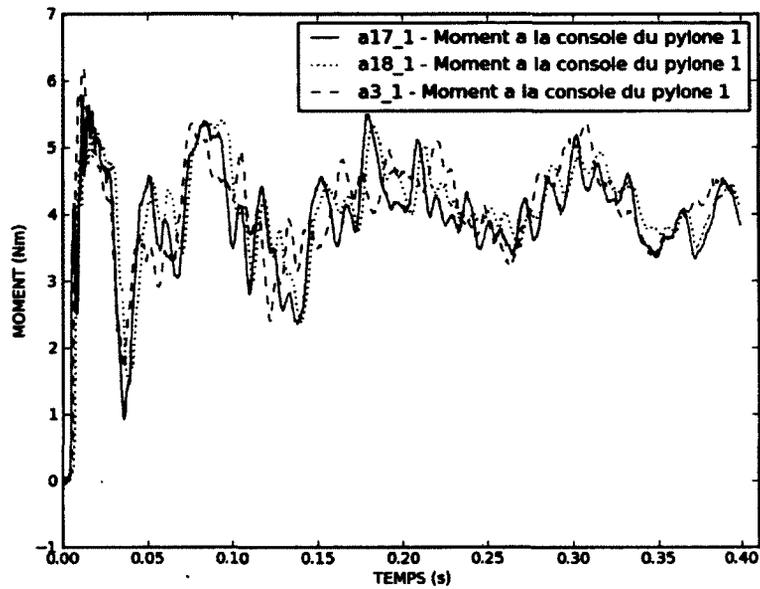


Figure 4.14 Efforts à la console du pylône 1 pour les essais A17, A18 et A3

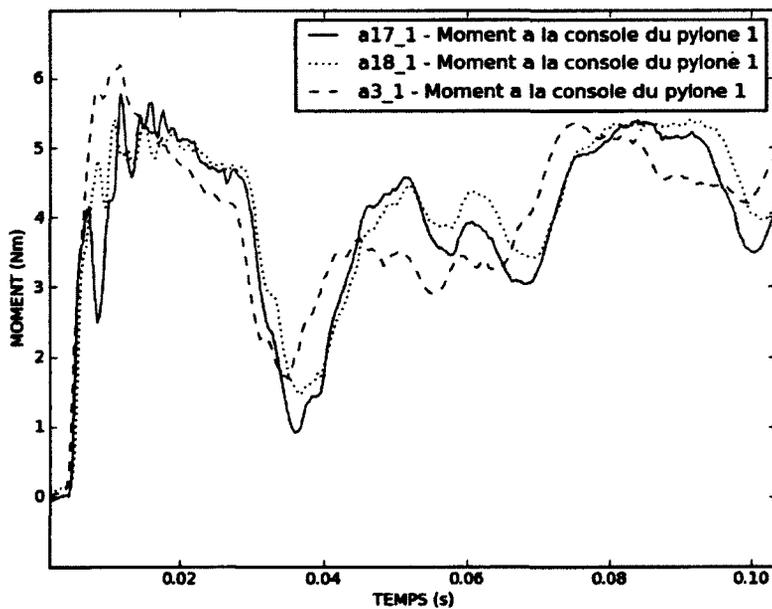


Figure 4.15 Efforts à la console du pylône 1 pour les essais A17, A18 et A3 pour les dix premières ms

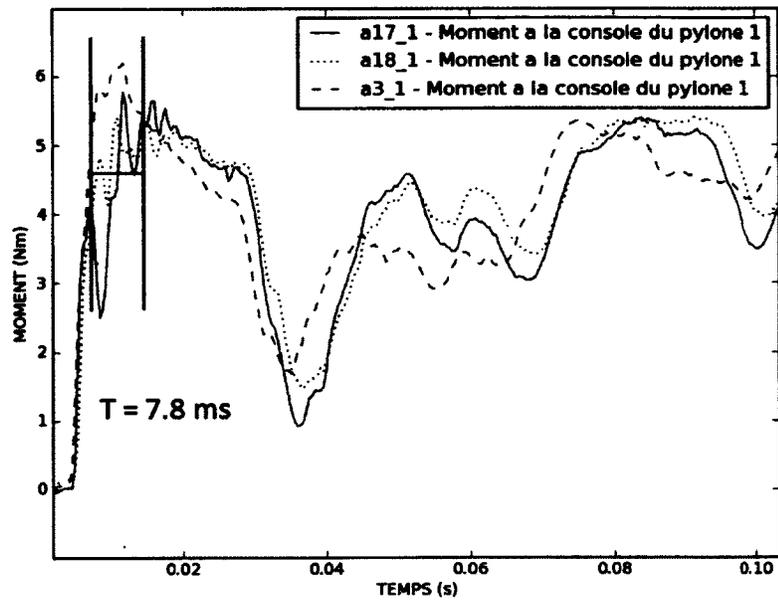


Figure 4.16 Durée de l'effort de pointe pour le cas A3

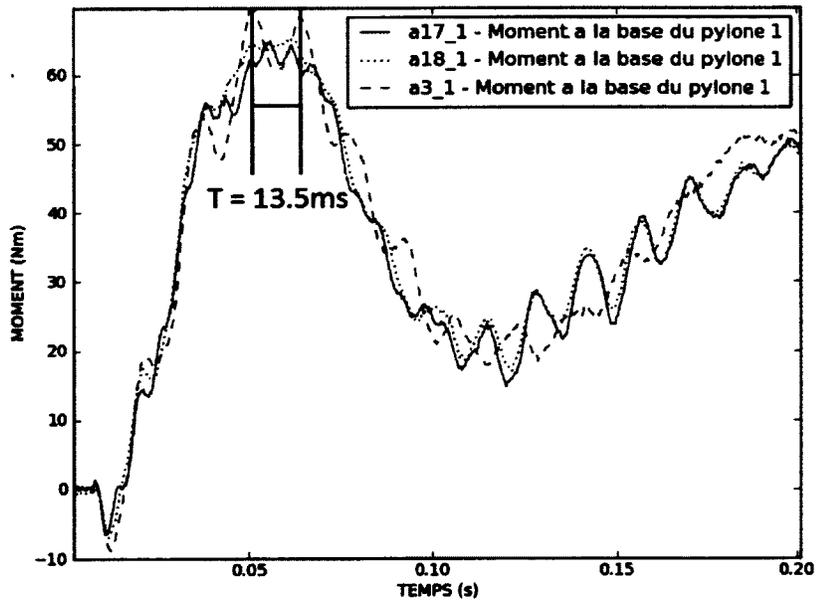


Figure 4.17 Période du second mode du pylône 1

### Transition du domaine 1, 2

La Figure 4.18 présente les courbes de la réponse transitoire du pylône 1 pour les cas A17[2.59mm] et A18[2.11mm] situés dans le domaine 1 et le cas A23[1.78mm], le premier cas du Domaine 2. La réduction des efforts au pylône 1 dans la configuration A23[1.78mm] est principalement obtenue à la première pointe de réponse. La Figure 4.19 montre le moment à la console du pylône 1. L'effet du mécanisme provenant de la limitation des efforts par la plastification de la section est observable dans les premières 35 ms suite au bris. De plus, la courbe présente un relâchement de la tension moyenne provenant du déplacement de la console, suite à l'atteinte de la limite élastique du mécanisme. La Figure 4.20 présente un agrandissement des 100 premières millisecondes. Le point de fin de la limite élastique y est indiqué. Suite à la plastification de la console, le moment continue à augmenter à cause de l'écroutissage de l'aluminium, ainsi que de l'alignement de la console dans l'axe de la ligne. On peut aussi constater sur la Figure 4.20 que les trois courbes sont superposées avant l'atteinte de la limite élastique, ce qui laisse croire que la rigidité de la console n'a pas d'influence sur la réponse du système dans cette configuration.

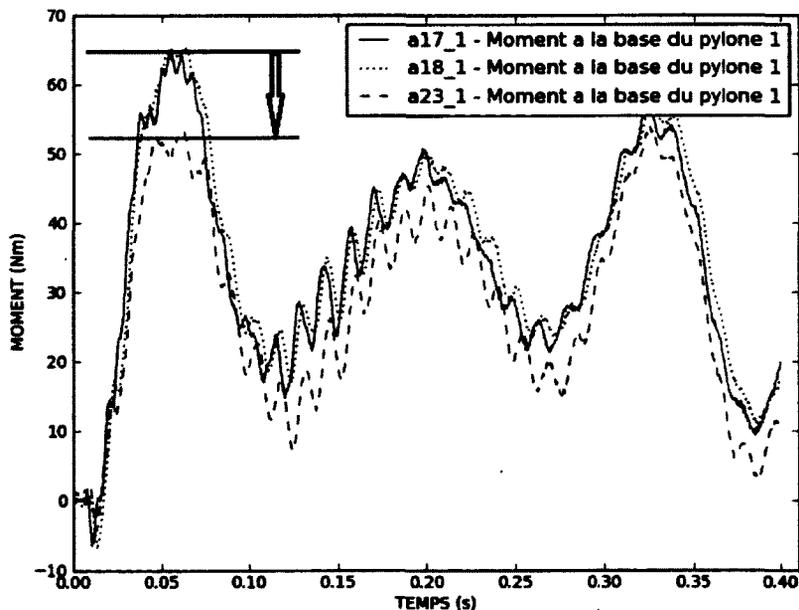


Figure 4.18 Comparaison des efforts à la base du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23

La Figure 4.21 présente la réponse du moment à la base du pylône 2 pour les cas A17[2.59mm], A18[2.11mm] et A23[1.78mm]. Il est possible de constater que la courbe correspondant à l'essai A23[1.78mm] présente des maximums supérieurs aux deux autres courbes, et semble

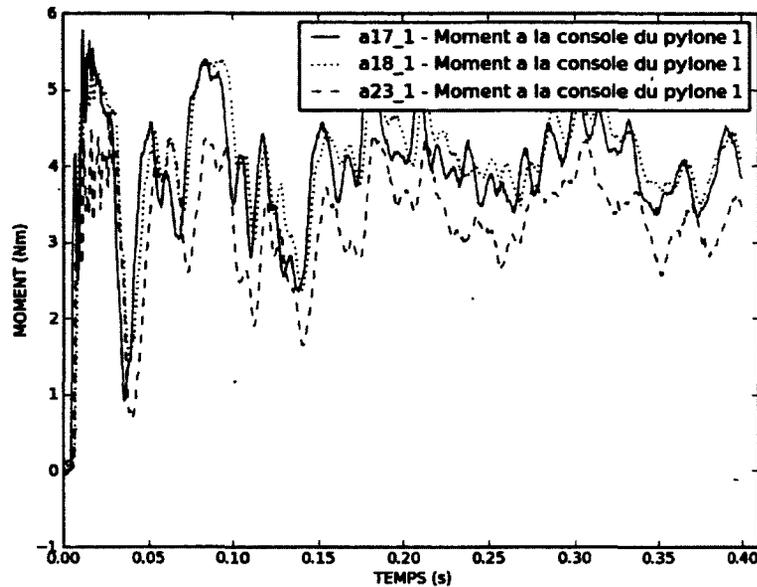


Figure 4.19 Comparaison des efforts à la console du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23

décalée vers le haut ce qui correspond à une augmentation de la moyenne des efforts. Ce phénomène est attribuable au relâchement de la tension au pylône 1, suite à la plastification de la console, ce qui accentue le débalancement des tensions au pylône 2. La Figure 4.22 présente les composantes dynamiques du moment à la base du pylône 2 pour les trois mêmes essais. De façon générale, on peut y constater que les courbes sont superposées, mis à part un pic additionnel que l'on retrouve sur la courbe de l'essai A23[1.78mm] suite à la plastification de la console au pylône 1. Cela suppose donc que l'augmentation des efforts au pylône 2 est directement reliée à l'augmentation du moment résiduel.

Le Tableau 4.7 résume les moments résiduels pour les cas A3[6.35mm], A17[2.59mm], A18[2.11mm] et A23[1.78mm]. La réduction marquée des moments résiduels au pylône 1 dans le cas A23[1.78mm] démontre le relâchement des tensions du canton provenant de la déformation de la console. L'augmentation des moments résiduels au pylône 2 y est aussi clairement exposée.

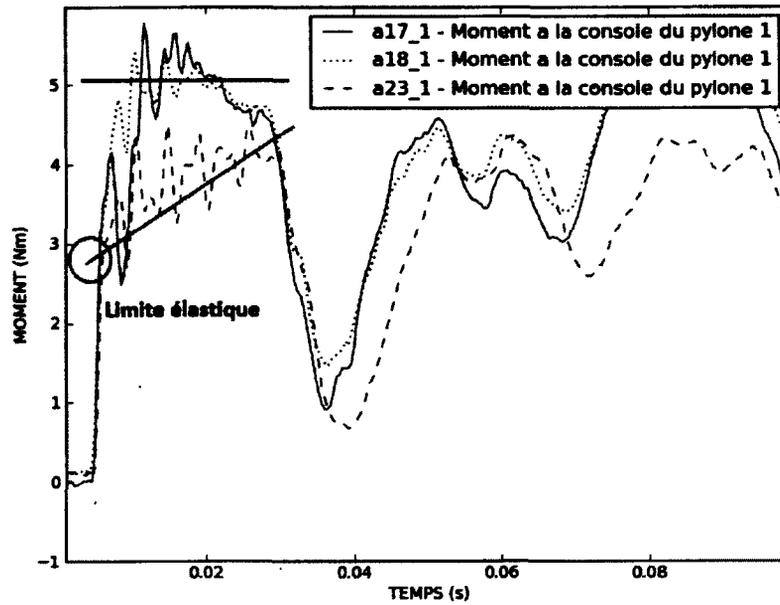


Figure 4.20 Comparaison des efforts à la console du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23 - [0 - 100ms]

Tableau 4.7 Moments résiduels pour les pylônes du domaine 1 et le cas A23[1.78mm] - configuration sans chaîne d'isolateurs

NOM	EP (mm)	$M_{res}$ PYL 1 (Nm)	$M_{res}$ PYL 2 (Nm)
A3-1	6.35	36.2	16
A17-1	2.59	34.9	16
A18-1	2.11	35.8	15
A23-1	1.78	27.9	20.8

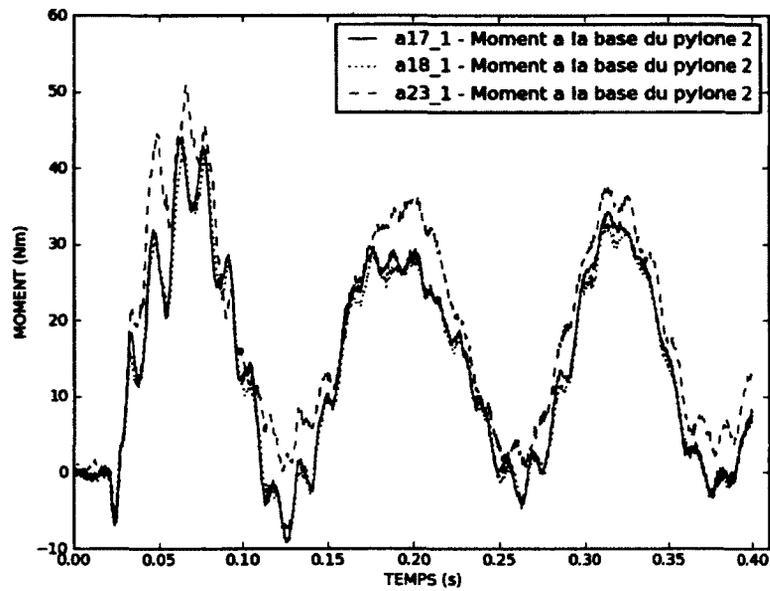


Figure 4.21 Comparaison des efforts à la base du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23

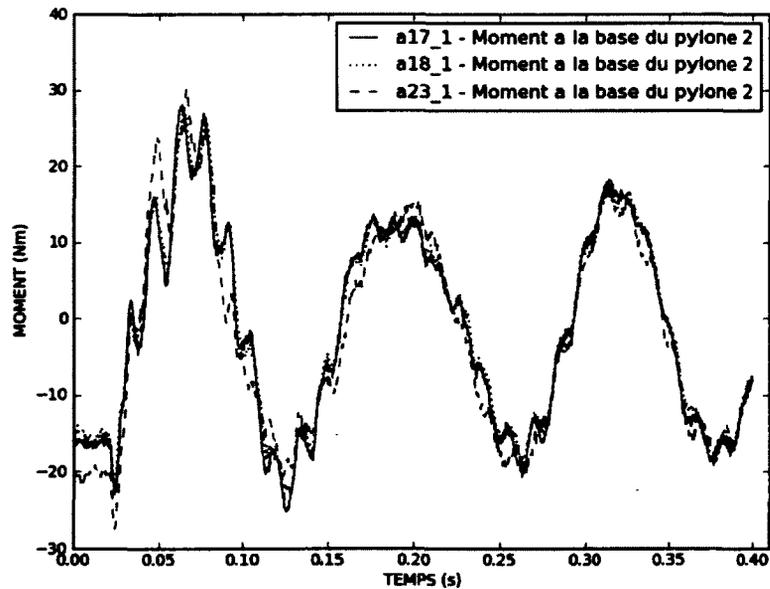


Figure 4.22 Comparaison des efforts à la base du pylône 1 pour les cas A17, A18 et A23 - avec correction pour le moment résiduel final

### Mécanisme de réponse du Domaine 2

Le deuxième domaine de comportement est caractérisé par la plastification de la console bien en deçà des efforts de référence, tout en conservant une capacité ductile permettant de maintenir une certaine retenue sur le conducteur. Le Tableau 4.8 présente les résultats obtenus pour cette catégorie de console. De façon générale, on peut y constater une diminution des efforts au pylône 1 et une augmentation au pylône 2.

L'effet premier de cette déformation est la réduction du moment au pylône 1. La Figure 4.23 présente les courbes des moments à la console du pylône 1 pour les essais A3[6.35mm], A22[1.52mm] et A23[1.78mm]. Sur cette figure, la limite élastique des mécanismes est clairement observable. La pente suivant le point de plastification est principalement due à la déformation de la console qui s'aligne avec l'axe du canton. Cette pente confirme que le mécanisme présente une bonne capacité ductile. Les fusibles du domaine 3 présentent une réponse différente qui est présentée en détail dans la section 4.2.2. L'effet du déplacement du point d'attache par déformation de la console engendre aussi une augmentation de la phase de chute libre du conducteur. Cet effet se produit lorsque le changement de longueur de la portée, qui est dû au déplacement des pylônes et à la déformation de la console, s'il y a lieu, est plus rapide que la vitesse de chute du conducteur. Par le fait même, l'augmentation du temps de chute engendre un décalage des différentes variations de tension dans le canton tel que présenté à la Figure 4.25.

La Figure 4.24 présente les moments à la base du pylône 2 pour les essais A3[6.35mm], A22[1.52mm] et A23[1.78mm]. Sur les courbes il est possible d'observer l'effet de la plastification hâtive de la section de la console du pylône 1, par l'augmentation précoce des efforts à la base du pylône 2. Le transfert de la pointe encerclée sur la Figure 4.23 vient donc créer l'augmentation des efforts au pylône 2, traduit par l'apparition d'une pointe présentée à la Figure 4.24. Au Tableau 4.8, on peut constater que la diminution des efforts au pylône 1 est plus importante que l'augmentation au pylône 2. Cela se traduit par un ratio des efforts au canton inférieur à 1.

Tableau 4.8 Moments maximaux et moments résiduels pour les pylônes du domaine 2 comparaison avec la valeurs de référence - configuration sans chaîne d'isolateurs

NOM	EP (mm)	$M_{max}$ PYL 1 (Nm)	$M_{max}$ PYL 2 (Nm)	$M_{res}$ PYL 1 (Nm)	$M_{res}$ PYL 2 (Nm)
A3	6.35	67.3	44.8	35.6	15.9
A23-1	1.78	53.8	50.8	27.9	20.8
A22-1	1.52	47.8	51.8	19.6	23.9

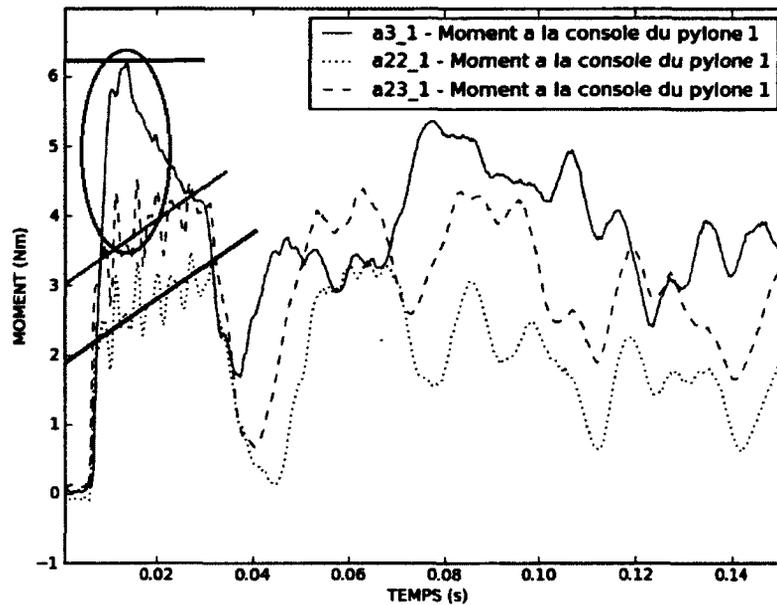


Figure 4.23 Comparaison des efforts à la console durant la première pointe suite au bris pour les cas A3, A23 et A22

Bien que l'amplitude du premier pic soient plafonnée par le mécanisme ductile, on peut constater à la Figure 4.26 que la durée de ce pic ne semble pas être influencée par le bris de la console. Il serait donc possible d'estimer l'effet de cette pointe à la base du pylône par un calcul d'impulsion carrée. L'estimation peut être faite à partir du premier mode pour une fréquence de 8 Hz. L'équation 4.2 [CLOUGH et PENZIEN, 2003] peut être utilisée pour calculer la réponse d'un système à un degré de liberté à une impulsion carrée.

$$R(\alpha) = [1 - \cos 2\pi(t_1/T)\alpha] \text{ pour } 0 < \alpha < 1$$

$$\alpha = \frac{t}{t_1}$$

$$\beta = \frac{T}{2 * t_1} \quad (4.2)$$

$T$  = Période du système

$t_1$  = Durée du demi-sinus

$t$  = Temps du chargement

Le Tableau 4.9 présente la comparaison entre les valeurs de moment à la base obtenues à l'aide des calculs d'impulsion avec les valeurs expérimentales. Le calcul d'impulsion permet

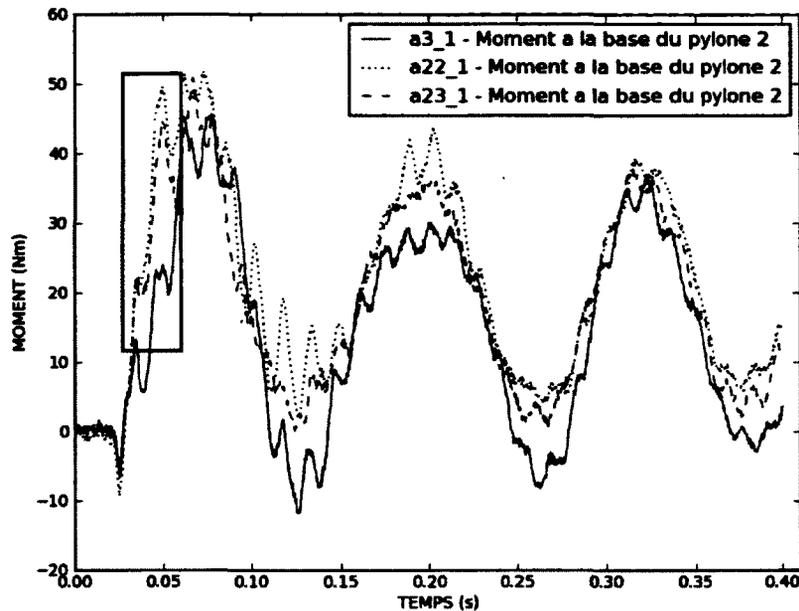


Figure 4.24 Comparaison des efforts au pylône 2 pour les cas A3, A23 et A22

d'estimer, dans un ordre de grandeur acceptable, les efforts à la base du pylône, pour une limite de rupture de la console déterminée et connaissant la réponse élastique du système. Cette approximation pourrait donc servir d'outil de conception lors de l'implantation d'un tel mécanisme en évitant plusieurs calculs dynamiques non-linéaires itératifs fastidieux. Tel que présenté au Tableau 4.9, le calcul simplifié effectué à l'aide de l'équation 4.2 permet d'obtenir une première approximation de l'effort maximal en fonction de la capacité du mécanisme ductile, permettant par la suite de limiter le nombre d'analyses dynamique non-linéaire pour le dimensionnement final du mécanisme.

Tableau 4.9 Réponse théorique à une impulsion carrée au pylônes 1

NOM	EP (mm)	$M_{max} 1$ (Nm)	$t_1$ (s)	$R(\alpha)$	Force (N)	$M_{max}$ théorique (Nm)
A23	1.78	52.6	0.0329	1.6	28.0	54.7
A22	1.52	40.3	0.0329	1.6	21.0	41.0

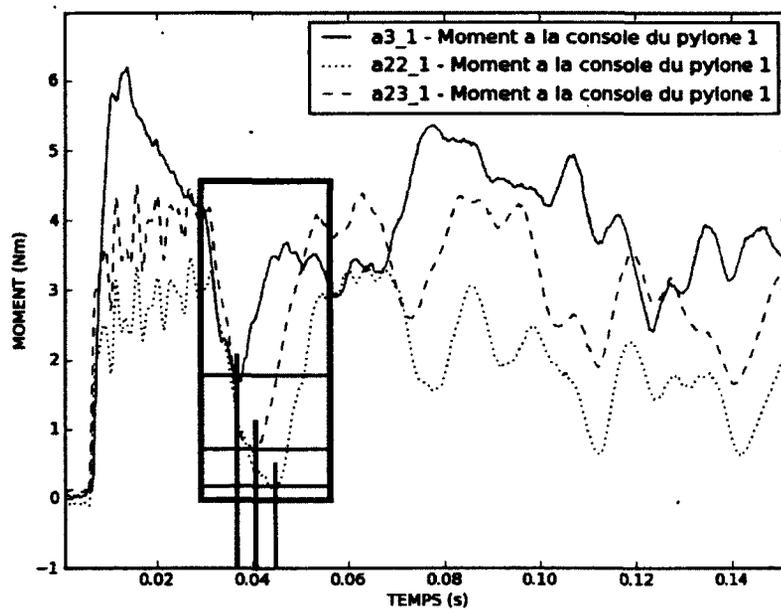


Figure 4.25 Augmentation du temps de chute pour les conducteurs de la portée 1, cas A3, A23 et A22

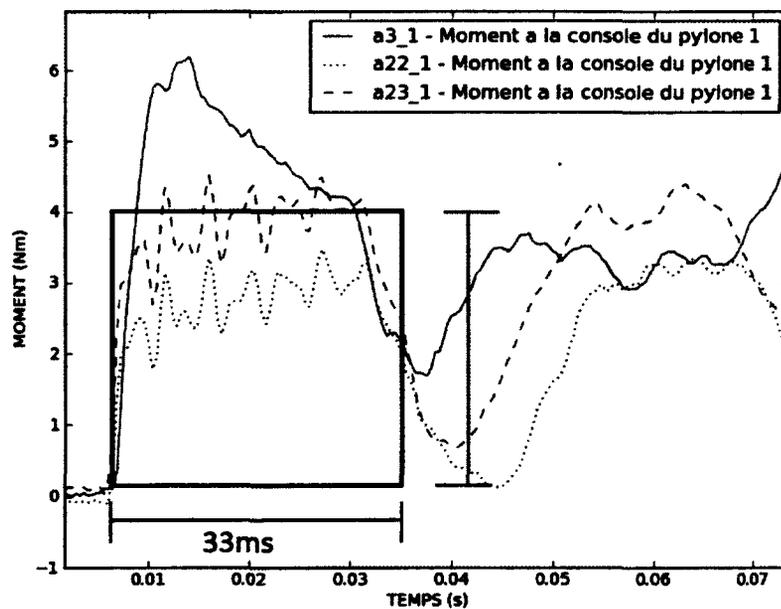


Figure 4.26 Évaluation des efforts de la première pointe par représentation d'une onde carrée, cas A3, A23 et A22

**Domaine 3**

Le troisième domaine est caractérisé par l'augmentation rapide des efforts au pylône 2. En effet, dans ce domaine de réponse, les efforts au pylône 2 atteignent, au final, les efforts de référence du pylône 1. Le tableau 4.10 présente un résumé des moments maximums et résiduels obtenus pour les essais du domaine 3. Il est possible d'y constater que les moments à la base du pylône 1 ne varient que très faiblement avec l'épaisseur de la console comparativement au domaine 2. L'effort au pylône 1 est contrôlé par la troisième pointe de réponse. La console étant déformée, sa rigidité est donc restituée par l'alignement de celle-ci dans l'axe de la ligne. De ce fait, les efforts sont donc transmis axialement au pylône limitant les réductions de possible. Le mécanisme étant trop faible, le pylône 1 présente une modification dans sa réponse. Les Figures 4.29, 4.30 et 4.31 présentent les réponses des pylônes 1 et 2. La console du pylône 1 étant trop faible, les efforts de déséquilibre du conducteur se reportent au pylône 2, le moment au pylône 2 est donc grandement accentué dans la première phase de réponse. L'utilisation d'un tel mécanisme pourrait donc causer une cascade des fusibles. Cette hypothèse ne peut être validée lors des essais à échelle réduite puisque le mécanisme fusible n'était installé que sur le premier pylône.

Tableau 4.10 Moments maximums et moments résiduels pour les pylônes de la phase 3 - configuration sans chaîne d'isolateurs

NOM	EP (mm)	$M_{max}$ PYL 1 (Nm)	$M_{max}$ PYL 2 (Nm)	$M_{res}$ PYL 1 (Nm)	$M_{res}$ PYL 2 (Nm)
A3	6.35	69.7	45.5	36.2	16.0
A19	1.27	47.0	55.7	16.3	25.0
A21	1.02	47.0	68.6	13.3	27.7
A20	0.81	53.5	67.9	13.5	29.0

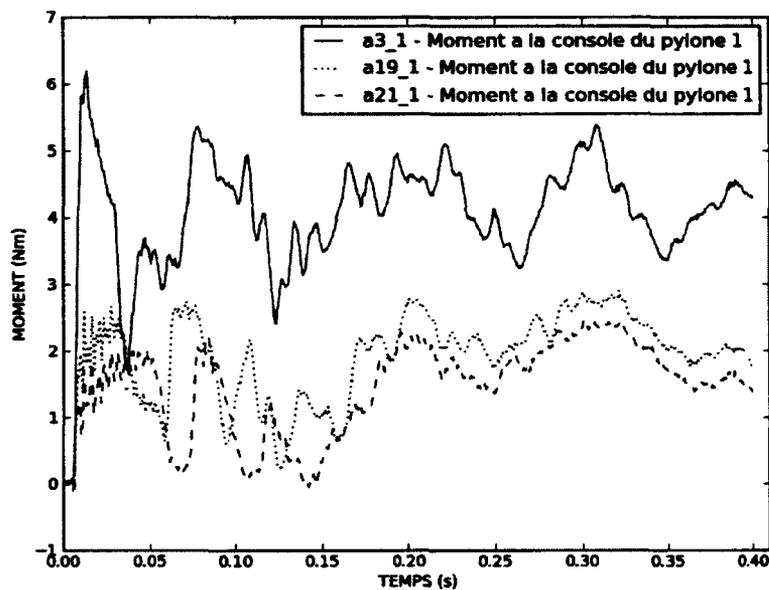


Figure 4.27 Comportement transitoire à la console du pylône 1, cas A3, A19 et A21

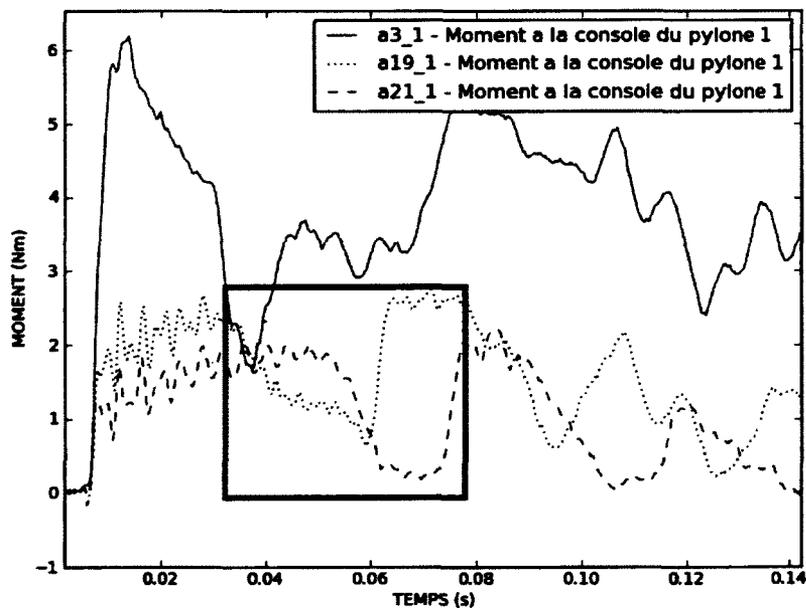


Figure 4.28 Comportement transitoire à la console du pylône 1 [0-150ms], cas A3, A19 et A21

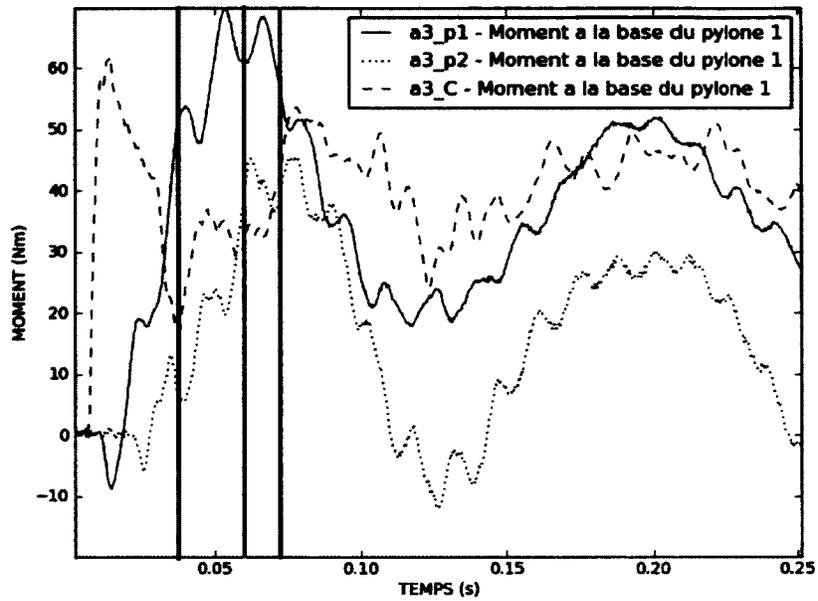


Figure 4.29 Comportement transitoire du cas A3

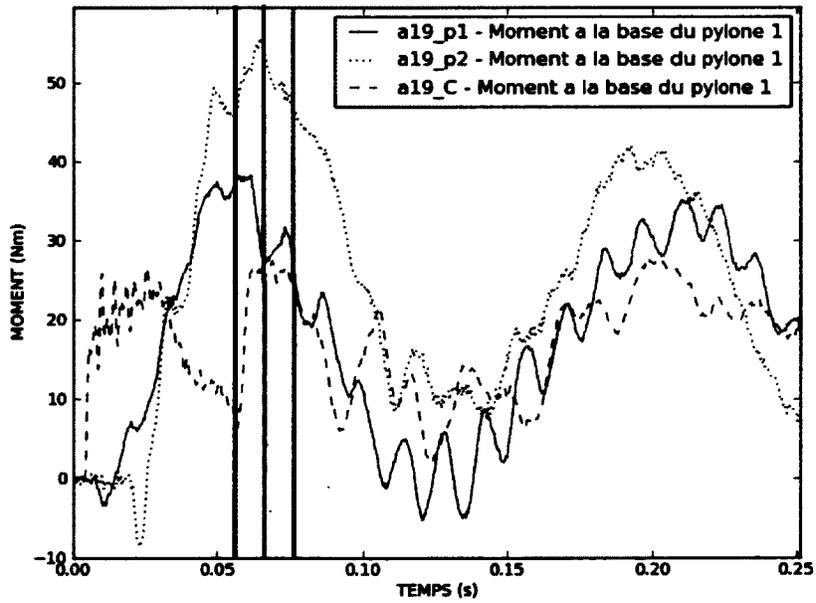


Figure 4.30 Comportement transitoire du cas A19

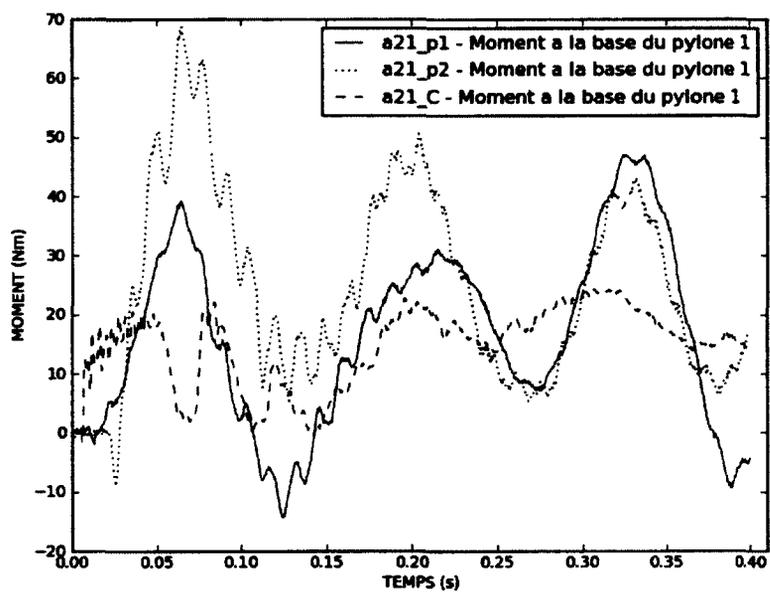


Figure 4.31 Comportement transitoire du cas A21

**Conclusion**

Les essais ont démontré que l'utilisation d'un mécanisme ductile permet la réduction des efforts au pylône 1. Pour ce faire, ce mécanisme se doit de posséder une capacité en deçà de la traction dynamique maximale. Par contre, le choix de ce mécanisme est critique. En effet, un mécanisme de trop faible capacité augmentera les efforts au second pylône au risque de déclencher une rupture en cascade. La réponse des mécanismes obtenue dans le second domaine représente donc un mécanisme fonctionnel pour réduire les efforts dynamiques au pylône. L'utilisation d'un mécanisme optimisé permet donc la réduction des efforts à la base du pylône de près de 33% pour une réduction globale des efforts au canton de 25%.



# CHAPITRE 5

## MODÉLISATION PRÉLIMINAIRE

### 5.1 Approche de modélisation par éléments finis

Une approche par éléments finis a été développée pour permettre la modélisation d'un canton soumis à des bris de conducteurs. Le logiciel utilisé pour effectuer l'étude est le logiciel Code-Aster. Code-Aster a été développé par EDF R&D [EDF, 2011] pour permettre le contrôle des outils de modélisation utilisés dans le cadre de ses activités. Code-Aster étant un logiciel ouvert il rend possible l'ajout directe dans le code source de fonction supplémentaire. De plus, le code étant ouvert, il offre la possibilité de vérifier directement dans la source la programmation des diverses fonctions pour en valider, au besoin, leurs approches.

Dans le cadre de cette étude, Code-Aster a été utilisé comme solveur. Un outil fut développé en langage de programmation Python [Python, 2011] pour la génération des modèles ainsi que des fichiers d'entrée. La validation de l'approche numérique utilisée a été effectuée par la modélisation des essais de MOZER [1978]. Ces modèles ont permis de définir les approches à utiliser pour permettre la modélisation et la validation de cantons possédant des matériaux linéaires. Par la suite, les paramètres de modélisation ont été utilisés pour modéliser les essais de cette étude en élastique et avec mécanisme ductile à la console.

### 5.2 Modélisation des essais de MOZER [1978]

En 1977, Mozer a effectué, pour le compte d'EPRI, une étude à échelle réduite sur une cinquantaine de cas de bris et de chute de glace. Le modèle de Mozer reprenait une ligne de 345kV à l'échelle 1 :30 et était constitué de deux supports, un câble de garde et un conducteur avec chaînes d'isolateurs. McCLURE et TINAWI [1989] ont repris six de ces essais pour effectuer une modélisation par éléments finis à l'aide du logiciel ADINA.

Dans le cadre de cette étude, la modélisation des six mêmes cas a été reprise pour valider notre approche numérique. Ces cas ont été sélectionnés car ils possédaient un câble de garde ce qui nous permettait d'étudier l'interaction avec celui-ci. Les résultats disponibles des travaux de Mozer sont les suivants :

- les efforts de cisaillement dans la console ;
- les moments à la base de la tour.

Les courbes originales ainsi que les valeurs de correspondances sont disponibles à l'annexe A. Ces résultats sont présentés sous forme de graphique. Pour effectuer la comparaison, les graphiques ont dû être numérisés point par point à l'aide du logiciel DigitizeIt [DigitizeIt, 2011].

Le tableau 5.1 présente les propriétés des chaînes d'isolateurs, des câbles de garde ainsi que des conducteurs pour chacun des cas modélisés lors de cette étude.

Tableau 5.1 Liste des paramètres d'essais pour les modélisations basées sur les essais de Mozer [MOZER, 1978]

MODÈLE	L ISO (mm)	Tension câble de garde (N)	Tension conducteur (N)
E20	114	6.58	68.05
E21	114	13.03	67.16
E22	114	20.59	66.72
E31	114	13.79	45.81
E35	76	6.76	69.39
E36	76	15.26	70.28

### Formulation du modèle par éléments finis

Un modèle détaillé du banc d'essais a été réalisé. Les pylônes ont été modélisés par des éléments poutre en grand-déplacement. La formulation est présentée dans la référence suivante : [FLEJOU, 2011]. Les conducteurs ont été modélisés à l'aide d'éléments de câble [FLEJOU, 2010], la mise en flèche a été effectuée par l'application d'un différentiel thermique. Le différentiel thermique a été calculé selon l'équation 5.1. Cette méthode permet la conception d'un seul modèle pouvant être ajusté aux différentes tensions requises. Un outils métier en langage Python a été développé pour automatiser le calcul des réglages de conducteurs et permettre l'entrée dans Code-Aster.

$$\Delta T_{thermcable} = ((L_0 - l_{portee}) / l_{portee}) / \alpha_{thermcable}$$

$$L_0 = \text{Longueur à vide en mètre}$$

$$l_{porte} = \text{Portee en mètre} \quad (5.1)$$

$$\Delta T_{thermcable} = \text{Différentiel thermique en degrés Kelvin}$$

$$\alpha_{thermcable} = \text{Coefficient de dilatation thermique du câble}$$

### Étapes de modélisation

L'analyse du canton a été effectuée en plusieurs étapes. La première étape consiste en l'atteinte de l'équilibre statique. Dans cette étape, le canton modélisé est soumis aux déformations thermiques et à la gravité pour permettre la mise en flèche des câbles. Une force équivalente à la force longitudinale ainsi qu'à la force verticale est positionnée au point de bris du conducteur pour modéliser la continuité du canton. Par la suite, le canton stabilisé (déplacements, déformations et efforts internes) est transféré au solveur dynamique pour le calcul de la réponse transitoire du aux retrait des forces au point d'attache, représentant ainsi le bris de conducteur. La réponse dynamique du canton est obtenue à l'aide d'un solveur implicite avec schéma d'intégration HHT- $\alpha$ ;  $\alpha = -0.3$ . Les éléments de câble développés dans le logiciel Code-Aster ne sont utilisables qu'avec une résolution implicite. La résolution s'effectue sur les premières 400 ms suivant le bris. La durée de 400 ms a été choisie pour correspondre avec celle utilisée par McCLURE et TINAWI [1989].

## 5.3 Résultats de la validation élastique des essais

La modélisation des six cas a été effectuée dans le cadre de cette étude. Les résultats sont présentés sous le nom HHT=-0.3 C-Aster. Les résultats des modélisations sont présentés aux Tableaux 5.2 et 5.3. Les colonnes Moment 1 ou cisaillement 1 et t1 représentent respectivement l'amplitude maximale de la première pointe et l'instant auquel s'est produit cette pointe. Les mêmes informations sont présentées pour la seconde pointe d'effort (moment à la base ou cisaillement selon le tableau).

Les figures 5.1 à 5.12 présentent les courbes de réponses des différents cas. Les cisaillements à la console obtenus à l'aide des modèles numériques concordent très bien avec les résultats expérimentaux. Les différences obtenues proviennent généralement de modes supérieurs qui semblent comporter un plus grand amortissement dans les essais que dans le modèle. Cet effet se présente sur tous les cas entre 350 et 400 ms. Les efforts de flexion obtenus à la base du pylône présentent dans la majorité des cas une réponse très similaire à celle des essais. L'erreur reste très faible, en deçà de 5%. Les résultats sont présentés aux Tableaux 5.2 et 5.3. Le moment à la base de la structure pour les cas E21 et E22 présentent des différences significatives entre les réponses obtenues dans les essais et les modélisations. Les efforts de cisaillement à la console étant généralement comparables, le problème se situe donc dans la réponse du pylône. À cet effet, une modélisation a été effectuée pour le cas E21 pour afin valider l'effort de traction maximal obtenu au câble de garde. Suite à cette modélisation, il a été démontré que la contrainte obtenue dépasse l'ordre de grandeur

de la capacité d'un fil de cuivre de ce diamètre qui est de 36 N. La plastification du câble de garde se présente donc comme étant une hypothèse de la modification de la réponse entre le modèle et les essais. La Figure 5.5 présente la réponse en flexion de l'essai E22, une sur-rigidité sur la partie de retour de la deuxième pointe des efforts dans la réponse du modèle par éléments finis. Cette sur-rigidité peut s'expliquer par la présence d'un câble de garde restant élastique effectuant une retenue de la tête du pylône.

Tableau 5.2 Liste des résultats expérimentaux-Moment à la base du pylône

MODÈLE	SOURCE	Moment 1 (Nm)	t1 (s)	Écart Moment 1 (%)	Écart t1 (%)	Moment 2 (Nm)	t2 (s)	Écart Moment 2 (%)	Écart t2 (%)
E20	HHT=-0.3 C-Aster	16.8	0.16	5.0	-3.0	49.2	0.35	0.4	0.0
E20	E20C	17	0.16	6.25	-3.0	50	0.35	2.04	0.0
E20	E20D	15	0.17	-6.25	3.0	48	0.35	-2.04	0.0
E21	HHT=-0.3 C-Aster	16.6	0.16	10.67	-3.0	37	0.34	-2.63	0.0
E21	E21A	15	0.17	0.0	3.03	36	0.34	-5.26	0.0
E21	E21B	15	0.16	0.0	-3.03	40	0.34	5.26	0.0
E22	HHT=-0.3 C-Aster	16.6	0.16	10.67	0.0	31.7	0.32	-3.94	-8.57
E22	E22A	15	0.16	0.0	0.0	33	0.34	0.0	2.9
E22	E22B	15	0.16	0.0	0.0	33	0.36	0.0	0.0
E31	HHT=-0.3 C-Aster	13.4	0.18	21.82	-2.70	30.5	0.31	5.2	-4.6
E31	E31A	11	0.19	0.0	2.7	28	0.32	-3.45	-1.54
E31	E31B	11	0.18	0.0	-2.7	30	0.33	3.45	1.54
E35	HHT=-0.3 C-Aster	19.9	0.13	24.38	-3.70	50.7	0.31	5.63	-6.06
E35	E31A	16	0.13	0.0	-3.7	49	0.32	2.08	-3.03
E35	E22B	16	0.14	0.0	3.7	47	0.34	-2.08	3.03
E36	HHT=-0.3 C-Aster	21.2	0.13	32.5	8.33	36.4	0.31	4.0	-8.8
E36	E36A	16	0.12	0.0	0.0	35	0.34	0.0	0.0

Tableau 5.3 Liste des résultats expérimentaux-Cisaillement à la base de la console

MODÈLE	SOURCE	Cisaillement 1 (N)	t1 (s)	Écart Cisaillement 1 (%)	Écart t1 (%)	Cisaillement 2 (N)	t2 (s)	Écart Cisaillement 2 (%)	Écart t2 (%)
E20	HHT=-0.3 C-Aster	45.9	0.11	10.6	-4.35	79.2	0.34	4.21	-2.86
E20	E20C	41	0.12	-1.2	-4.35	77	0.34	1.32	-2.86
E20	E20D	42	0.12	1.2	4.35	75	0.36	-1.32	2.86
E21	HHT=-0.3 C-Aster	45.3	0.11	10.49	-8.33	77.8	0.33	7.03	-2.94
E21	E21A	41	0.12	0.0	0.0	70	0.34	-3.45	0.0
E21	E21B	41	0.12	0.0	0.0	75	0.34	3.45	0.0
E22	HHT=-0.3 C-Aster	45.2	0.11	11.60	-4.35	68.6	0.33	-2.70	-1.49
E22	E22A	40	0.12	-1.23	4.35	68	0.34	-3.55	1.49
E22	E22B	41	0.11	1.23	-4.35	73	0.33	3.55	-1.49
E31	HHT=-0.3 C-Aster	30	0.13	15.38	-7.14	63.7	0.24	6.17	-2.04
E31	E31A	26	0.14	0.0	0.0	58	0.24	3.33	-2.04
E31	E22B	26	0.14	0.0	0.0	60	0.25	-3.33	-2.04
E35	HHT=-0.3 C-Aster	56.1	0.07	13.33	-6.67	70.6	0.31	6.97	3.33
E35	E31A	51	0.07	3.03	-6.67	69	0.3	4.55	0.00
E35	E22B	48	0.08	-3.03	-6.67	63	0.3	-4.55	0.00
E36	HHT=-0.3 C-Aster	56.7	0.07	15.71	16.67	71.7	0.30	3.91	-7.14
E36	E36A	49	0.06	0.0	0.0	69	0.28	0.0	0.0

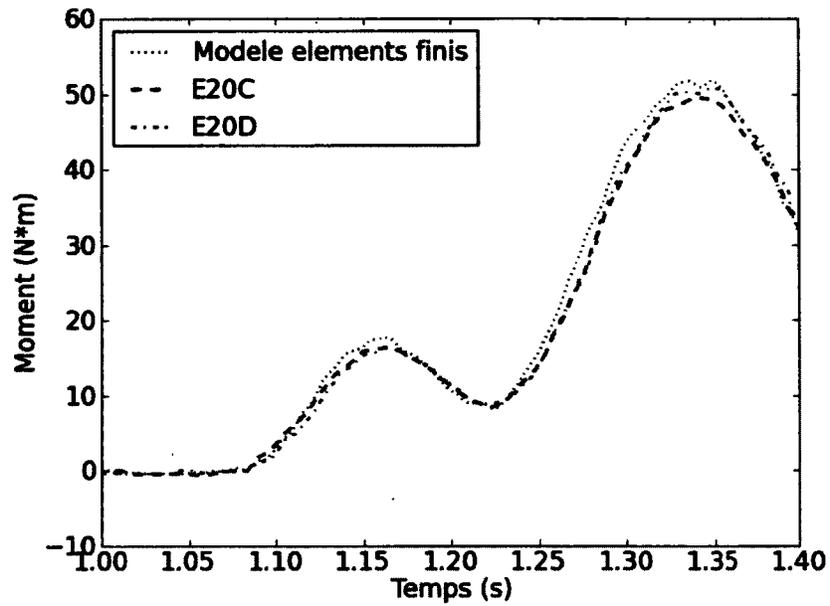


Figure 5.1 Résultats E20 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

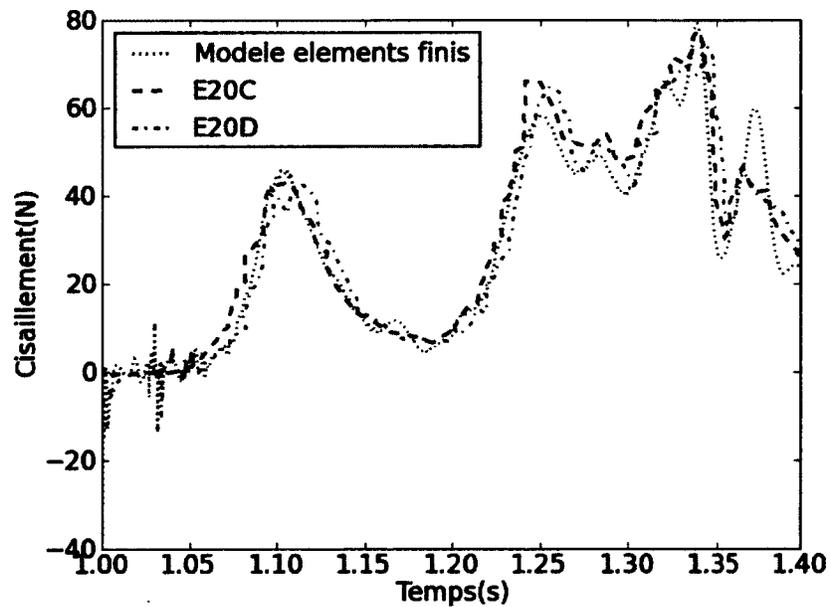


Figure 5.2 Résultats E20 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

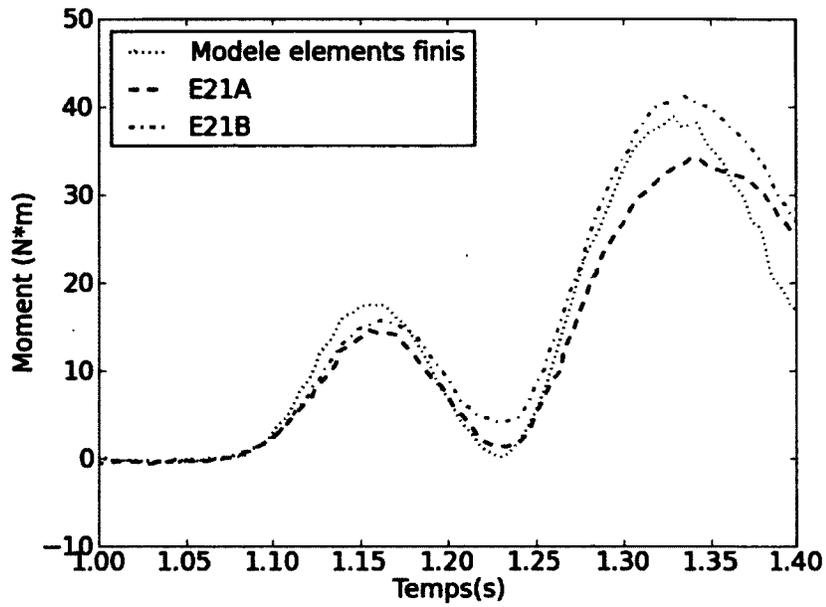


Figure 5.3 Résultats E21 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

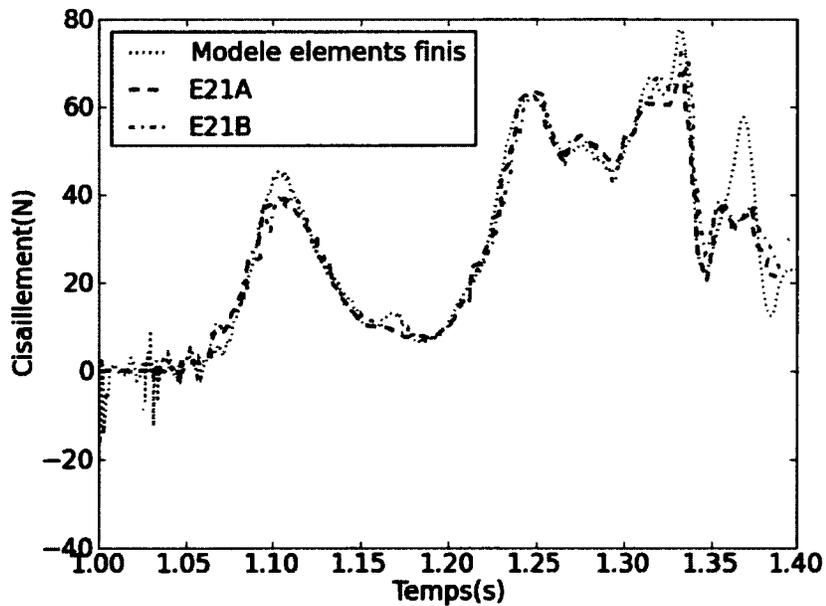


Figure 5.4 Résultats E21 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

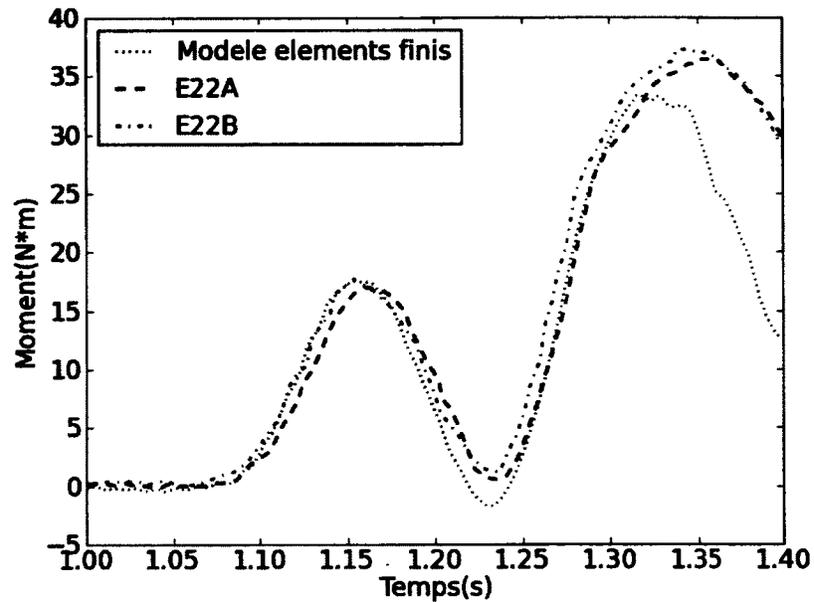


Figure 5.5 Résultats E22 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

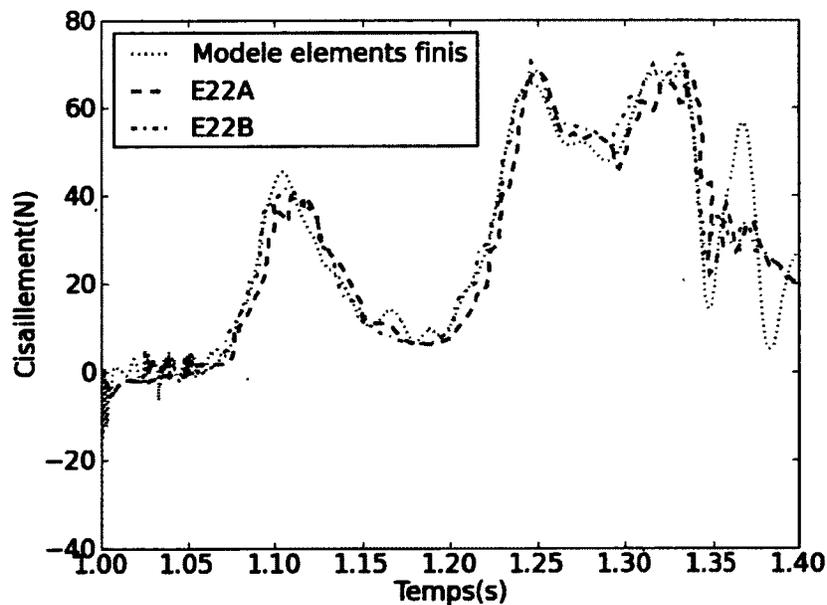


Figure 5.6 Résultats E22 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

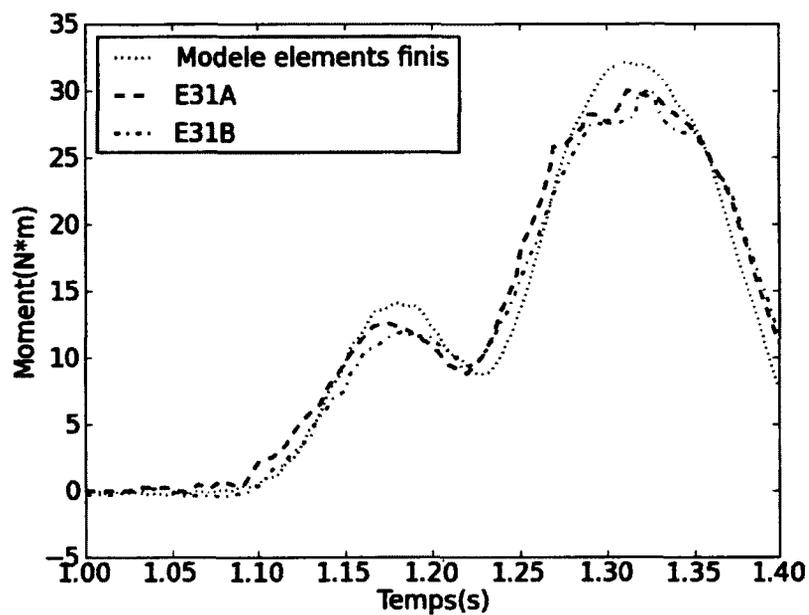


Figure 5.7 Résultats E31 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

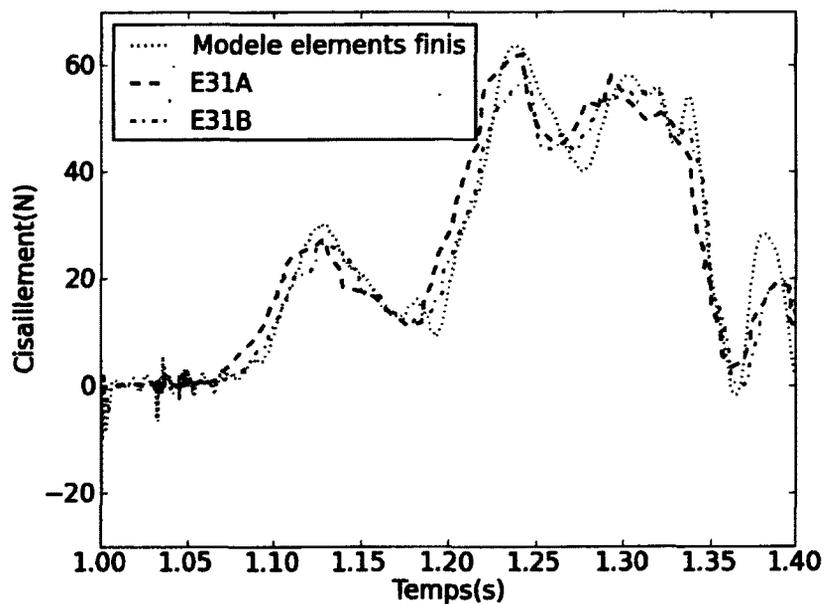


Figure 5.8 Résultats E31 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

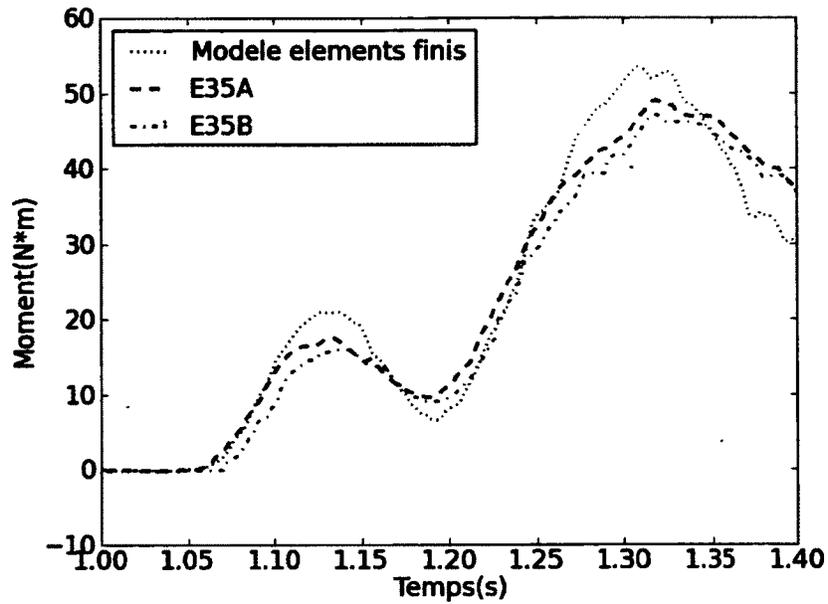


Figure 5.9 Résultats E35 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

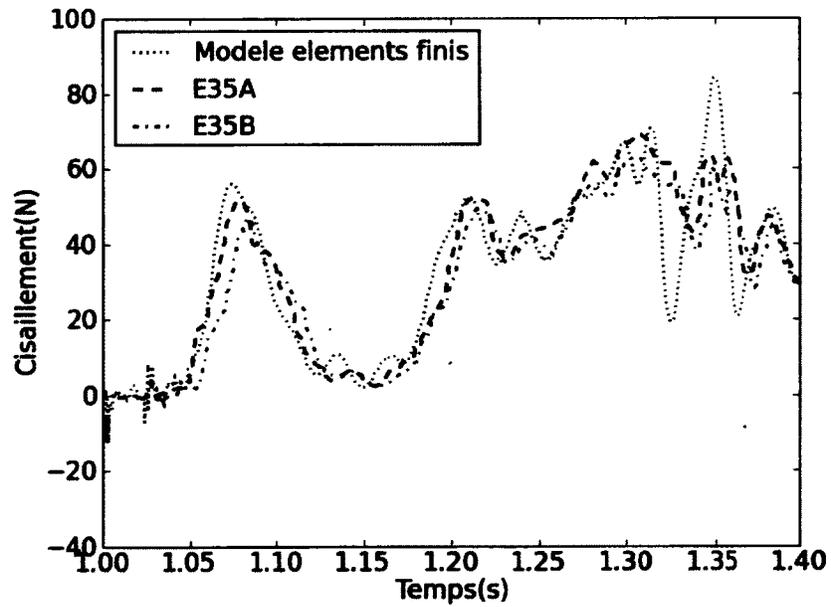


Figure 5.10 Résultats E35 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

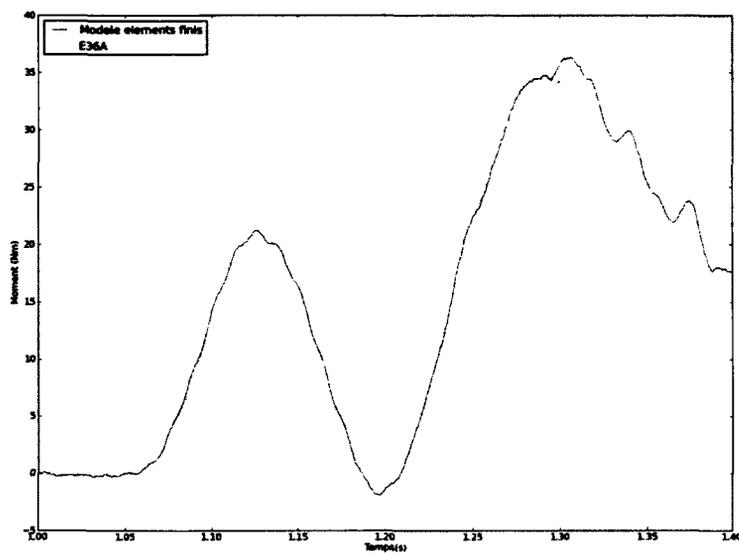


Figure 5.11 Résultats E36 Moment à la base (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

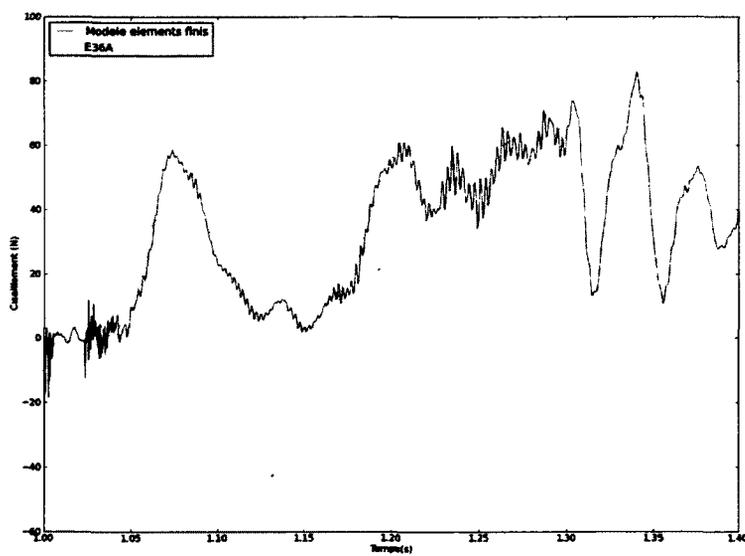


Figure 5.12 Résultats E36 Cisaillement à la console (HHT=-0.3, dt=0.1ms)

**Résultats de la modélisation non-linéaire du câble de garde**

Pour valider l'hypothèse de la plastification du câble de garde, un modèle prenant en compte un comportement élasto-plastique parfaitement plastique pour le câble de garde a été effectué pour les cas E21 et E22. Les Figures 5.13 et 5.14 présentent les réponses du système avec prise en compte de la plastification. L'ajout de la plasticité permet de corriger l'écart entre les moments du modèle élastique et les essais. L'oscillation apparaissant en tête de la deuxième pointe provient du relâchement provenant de la transition entre la partie élastique et le plateau plastique du câble de garde.

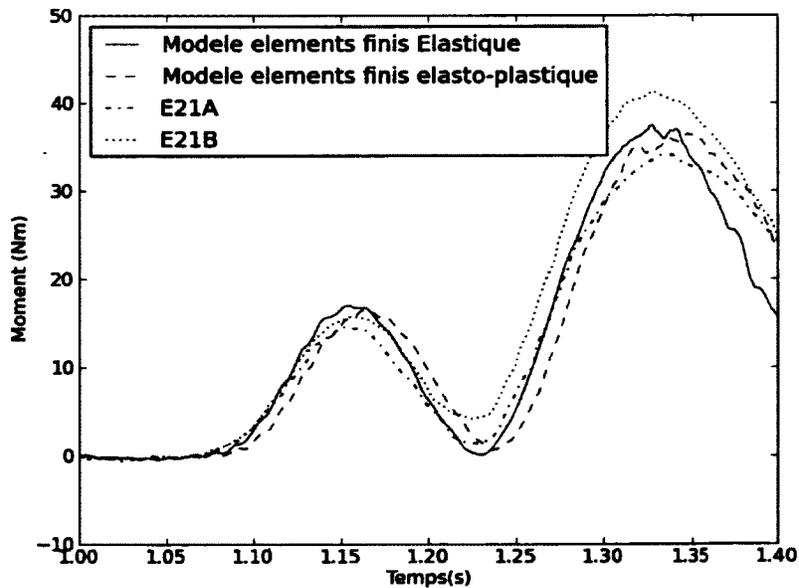


Figure 5.13 Résultats E21 Moment à la base + Câble de garde Élasto-plastique

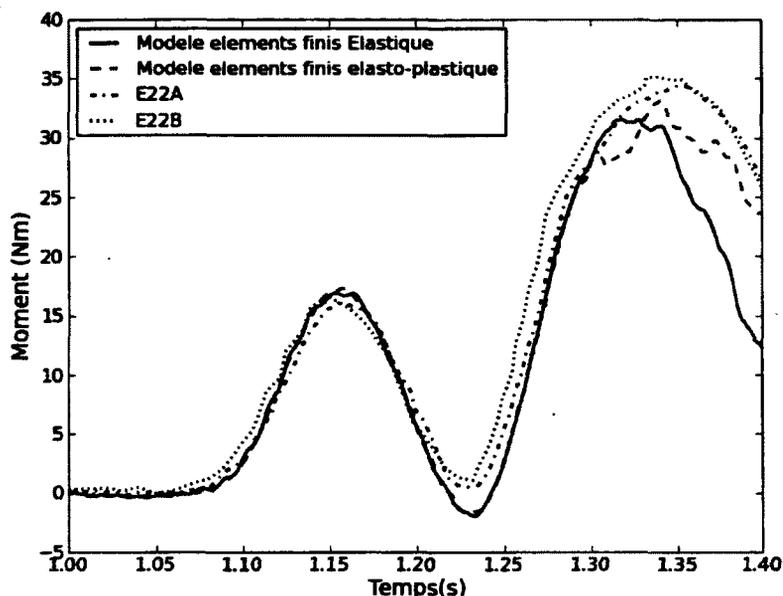


Figure 5.14 Résultats E22 Moment à la base + Câble de garde Élasto-plastique

## 5.4 MODÉLISATION DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Pour compléter la validation élastique et de plus valider la modélisation en présence d'une console ayant un comportement élasto-plastique, certains essais effectués dans le cadre de ce projet ont été modélisés en utilisant la même approche que celle présentée précédemment.

### ESSAIS LINÉAIRE

La modélisation d'essais linéaires a été effectuée pour valider le comportement général du modèle par rapport à la configuration du banc d'essais. Les essais A1 à A5 ont été modélisés. Les Tableaux 5.4 et 5.5 présentent les résultats obtenus. L'écart obtenu pour les différents modèles se situe sous les 10 % pour tous les essais à l'exception des efforts au pylône 1 pour l'essai A2. Les Figures 5.15, 5.16 et 5.17 présentent les résultats de la modélisation de l'essai A2. La tendance générale de la réponse est bien représentée entre les essais A2-1 et A2-2 et le modèle. La différence d'effort à la première pointe semble être contrôlée par l'expression du second mode du pylône. Le second mode du pylône 1 est majoritairement composé de la participation de la section inférieure du pylône. La Figure 5.18 présente la section qui est en fait la cellule de charge. La représentation simplifiée avec des éléments poutres ainsi que des masses ponctuelles de cet assemblage semble causer problème. En effet, aucun recalage de ce modèle n'a été effectué avec des

données de laboratoire ce qui limite la mise en place d'un modèle précis de cette section complexe. Les différentes connections entre les sections plus massives avaient tendance à se déserrer durant les essais, rendant plus complexe l'interprétation des résultats. Malgré ce problème, les résultats obtenus à partir des modèles pour les essais linéaires sont concluants et permettent la validation de notre outil pour ce type de configuration. Les courbes obtenues pour l'ensemble des modèles sont disponibles à l'Annexe B.

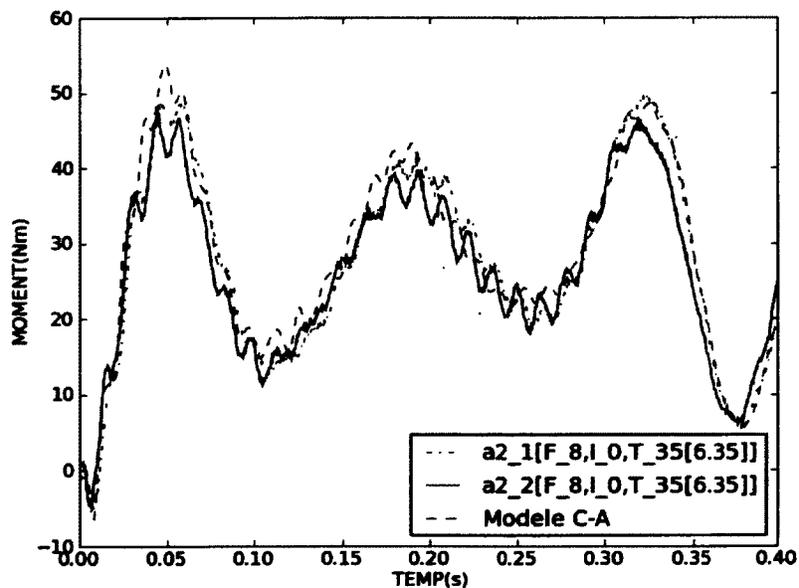


Figure 5.15 Résultats A2-1, A2-2 et Modèle Code-Aster - Moment à la base du pylône 1

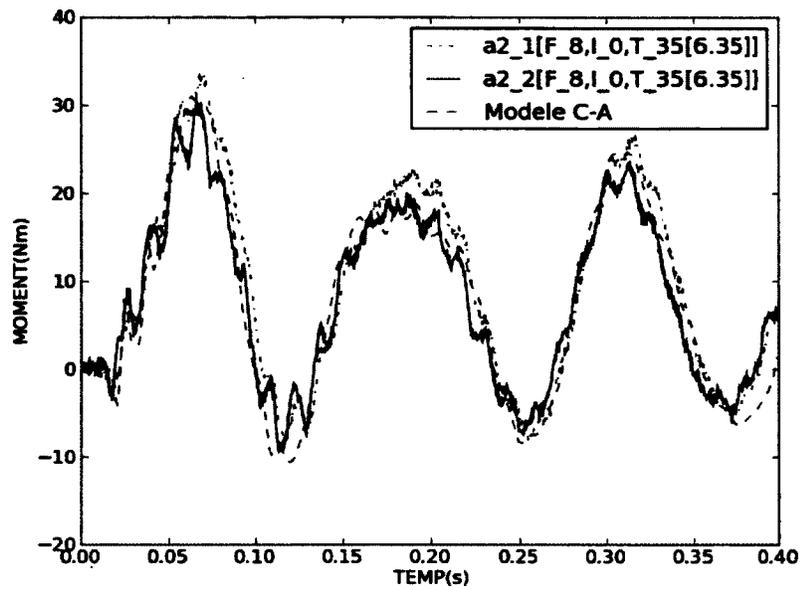


Figure 5.16 Résultats A2-1, A2-2 et Modèle Code-Aster - Moment à la base du pylône 2

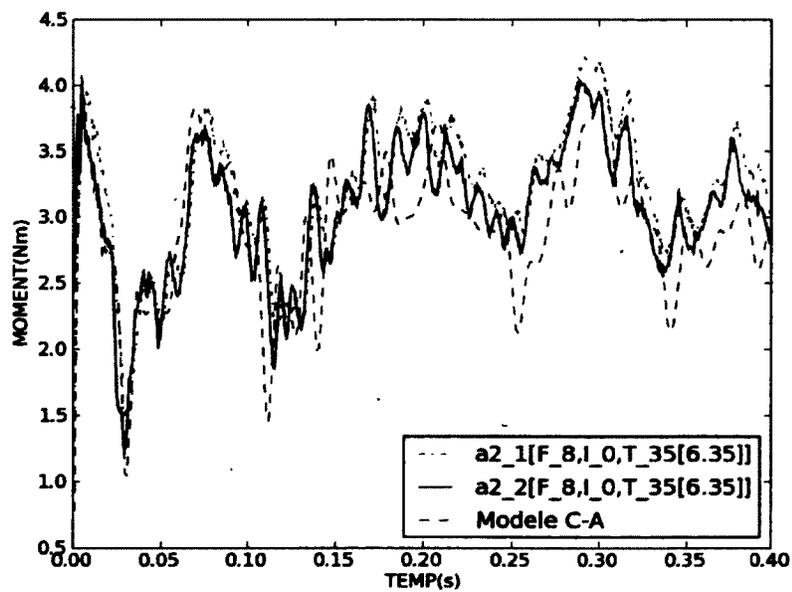


Figure 5.17 Résultats A2-1, A2-2 et Modèle Code-Aster - Moment à la console du pylône 1

Tableau 5.4 Modélisation élastique à l'aide du Logiciel Code-Aster, résultats à la base du pylône 1 pour les cas A1-A5

MODÈLE	$L_{ISO}$ (mm)	$T_{ini}$ (N)	$M_{max}$ référence (Nm)	$M_{max}$ (Nm)	% Écart (Nm)
A1	0.0	17.8	30.8	29.9	-2.9
A2	0.0	36.5	46.6	53.8	15.5
A3	0.0	53.4	69.5	76.4	9.9
A4	25.0	53.4	69.1	74.9	8.4
A5	76.0	53.4	71.7	76.6	6.8

Tableau 5.5 Modélisation élastique à l'aide du Logiciel Code-Aster, résultats à la base du pylône 2 pour les cas A1-A5

MODÈLE	$L_{ISO}$ (mm)	$T_{ini}$ (N)	$M_{max}$ référence (Nm)	$M_{max}$ (Nm)	% Écart (Nm)
A1	0.0	17.8	17.5	17.2	-1.7
A2	0.0	36.5	31.9	31.0	-2.8
A3	0.0	53.4	46.6	45.1	-3.2
A4	25.0	53.4	40.5	43.7	7.9
A5	76.0	53.4	31.2	30.7	-1.6

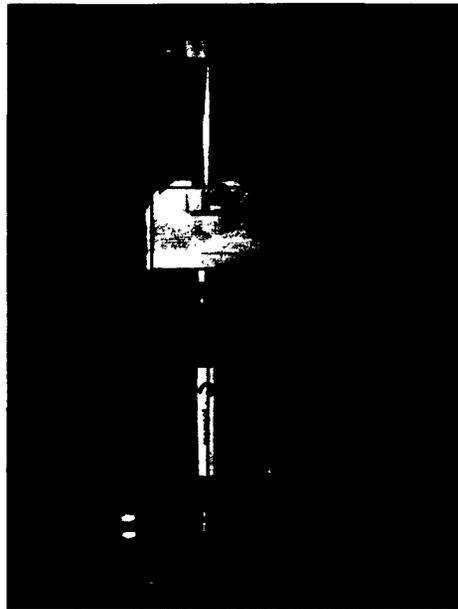


Figure 5.18 Représentation schématique de la section inférieure du pylône

### ESSAIS NON-LINÉAIRES AVEC MÉCANISME FUSIBLE

La validation de l'outil Code-Aster pour la prise en compte du modèle avec fusible à la console est très importante. La modification du modèle pour permettre la prise en compte de la section fusible à été approchée par deux méthodes. La première consistait à modéliser en maillage volumique la section de la console, pour ensuite utiliser la courbe obtenue dans un élément discret. La figure 5.19 présente un exemple de modèle utilisé. L'analyse de la console ainsi que l'entrée des résultats étaient très couteuses en temps. La modélisations présentait des problèmes de stabilité reliés aux grandes déformations plastiques obtenues à l'entaille, la section de la console était sensible au maillage et la convergence était de plus très complexe. Pour ces raisons, ce modèle n'a pas été retenue pour le restant de la modélisation.



Figure 5.19 Modélisation complète de la section fusible de console du pylône 1

La seconde méthode est l'utilisation de poutres multi-fibres non linéaires. La Figure 5.20 présente un exemple de section. Une loi non-linéaire élasto-plastique était assignée à chacune des fibres. Ce type de modélisation simplifie grandement la modélisation de la section réduite, par contre la rigidité élastique est différentes de la réalité. Ceci est dû au fait qu'en multi-fibre il n'est pas possible de modéliser un changement graduel de section. Le modèle est donc constitué d'une section réduite entre deux sections complètes. La formulation de Code-Aster permet l'utilisation de non-linéarité matérielle en grand déplacement sous l'hypothèse de petite déformation. Les déformations plastiques finales retrouvées à l'entaille ne respectent pas cette hypothèse, surtout pour les sections de très faibles dimensions. De plus, les grands déplacements de cet élément ne sont pas calculés de façon exacte. Pour chacune des itérations, une matrices de correction des rotations vient corriger les déplacements. La formulation est présentée dans les références suivantes : [DE SOZA, 2009] et [MOULIN, 2010] Pour faciliter l'entrée des données et simplifier le modèle, une loi élasto-plastique bilinéaire à écrouissage isotrope avec critère de plasticité de Von Mises a été utilisée. La courbe ainsi entrée représente donc de façon simplifiée la courbe de l'aluminium 6061-T6.

Les résultats obtenus sont en bon accord avec les essais, l'écart se situe sous les 20% et est généralement autour de 15%. Considérant que l'analyse élastique comportait un écart d'approximativement 5 à 10% et considérant les simplifications de l'élément multi-fibre et celles de la loi de comportement bi-linéaire, l'ajout de la non-linéarité matérielle à la console entraîne une erreur supplémentaire de 5 à 10% ce qui offre un niveau de précision très acceptable. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 5.6.



Figure 5.20 Section plan pour représentation de la distribution des fibres

Tableau 5.6 Résultats des modélisations avec fusibles à la console

NOM	EP (mm)	LISO (mm)	PLAQUE	$M_{max} 1$ (Nm)	$M_{max} 2$ (Nm)	$MFEA_{max} 1$ (Nm)	% ÉCART 1 (Nm)	$MFEA_{max} 2$ (Nm)	% ÉCART 2 (Nm)
A20-1	0.81	0	ACIER	53.5	67.9	63.3	15.5	80.9	27.8
A21-1	1.02	0	ACIER	47.0	68.6	53.6	14.0	72.4	5.5
A19-1	1.27	0	ACIER	47.0	55.7	49.7	5.7	62.0	11.3
A22-1	1.52	0	ACIER	47.8	51.8	50.4	5.7	58.0	12.0
A23-1	1.78	0	ACIER	53.8	50.8	59.8	11.2	47.9	-5.7
A18-1	2.11	0	ACIER	65.5	42.9	66.7	1.8	44.1	2.8
A17-1	2.59	0	ACIER	64.9	44.0	73.6	11.8	43.1	-2.04
A26-1	0.76	76	ACIER	54.1	63.4	57.1*	5.5	71.0*	12.0
A25-1	1.27	76	ACIER	50.5	51.3	60.0	18.8	57.9	5.4
A27-1	1.52	76	ACIER	59.0	42.0	60.6	2.7	51.5	18.4
A24-1	1.78	76	ACIER	66.8	39.4	69.8	4.5	39.7	0.8

**Réponse dynamique non-linéaire de la console fusible**

La réponse de la console étant le point important de ce modèle, la réponse de celle-ci dans les 3 domaines se doit d'être observée.

**Domaine 1** La réponse de la console dans le domaine 1 est bien représentée par la formulation utilisée. La réponse de la console est présentée à la Figure 5.21. On peut y voir la limitation de la charge ainsi qu'un plateau tel qu'obtenu lors de l'essai. Il est à noter que le domaine 1 n'est pas sujet à la limitation de l'élément en ce qui a trait aux grandes déformations plastiques. De plus, au domaine 1, la console ne subit pas de très grand déplacement simplifiant grandement le calcul la réponse. La rotation de la console est présentée à la Figure 5.22. Les résultats de la modélisation se comparent bien à ceux du laboratoire, tel que présenté à la Figure 5.21.

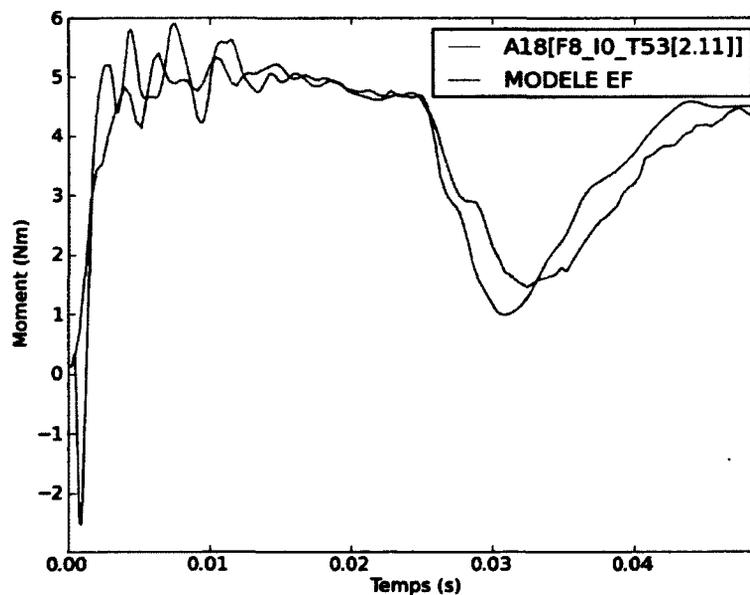


Figure 5.21 Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A18

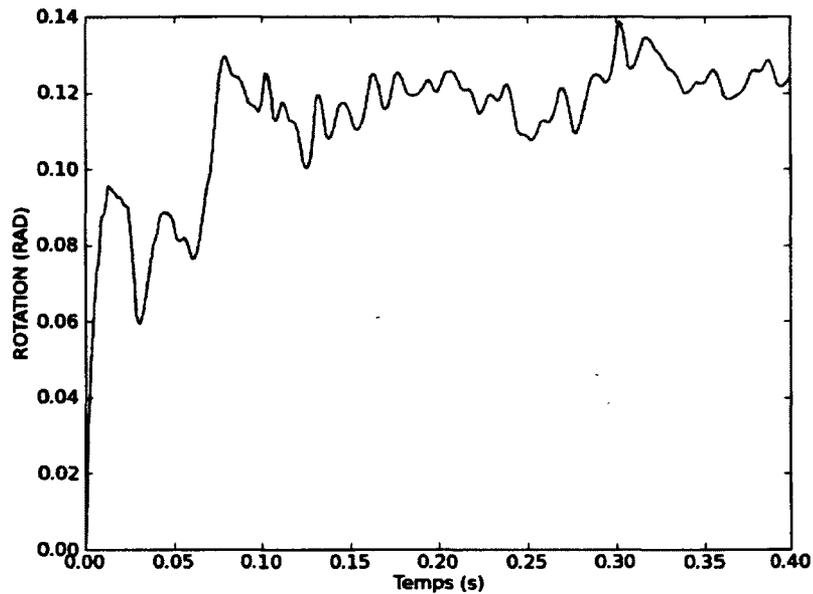


Figure 5.22 Rotation de la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A18

**Domaine 2** Dans le domaine 2, la console subit des déformations plastiques importantes, les déplacements de celle-ci sont par contre modérés. La Figure 5.24 présente la rotation de la console provenant des modélisations. Malgré la limitation au niveau des grandes déformations plastiques, la console se déforme de façon à représenter le comportement obtenu au laboratoire. Les Figures 5.23 et 5.25 présentent les moments à la console pour les essais avec et sans chaîne d'isolateurs.

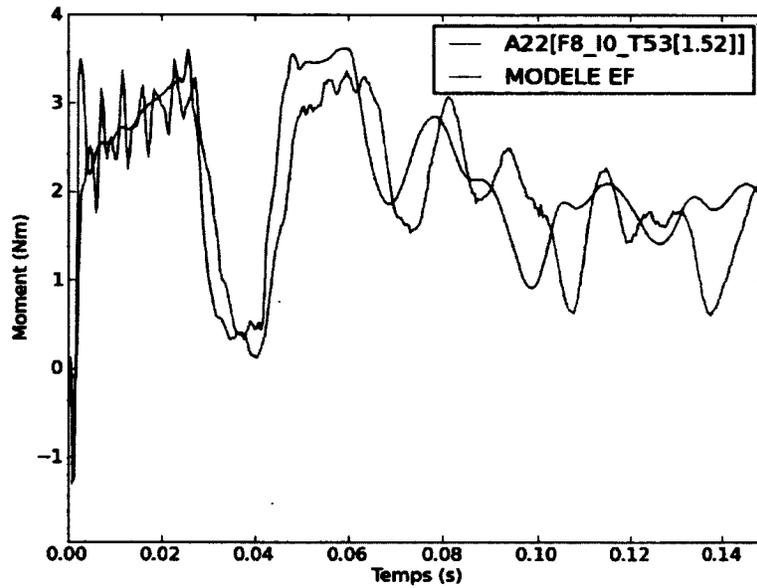


Figure 5.23 Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A22

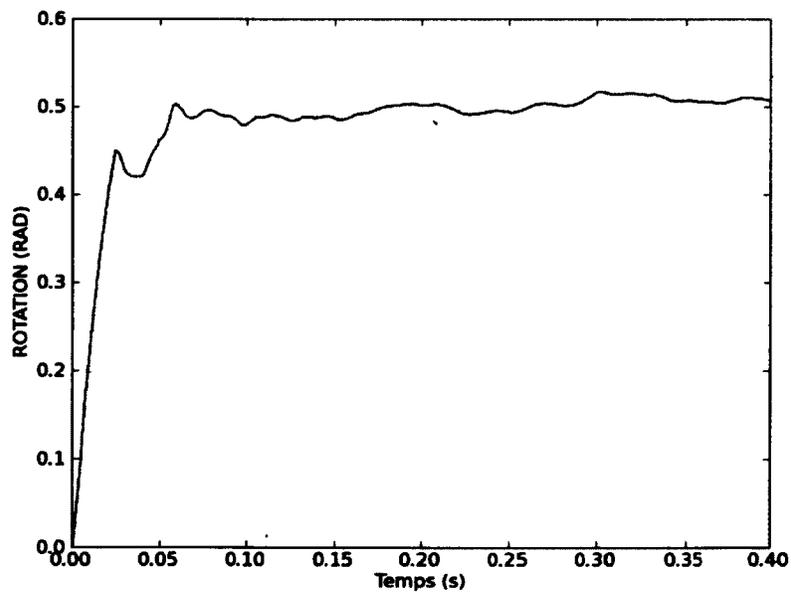


Figure 5.24 Rotation de la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A22

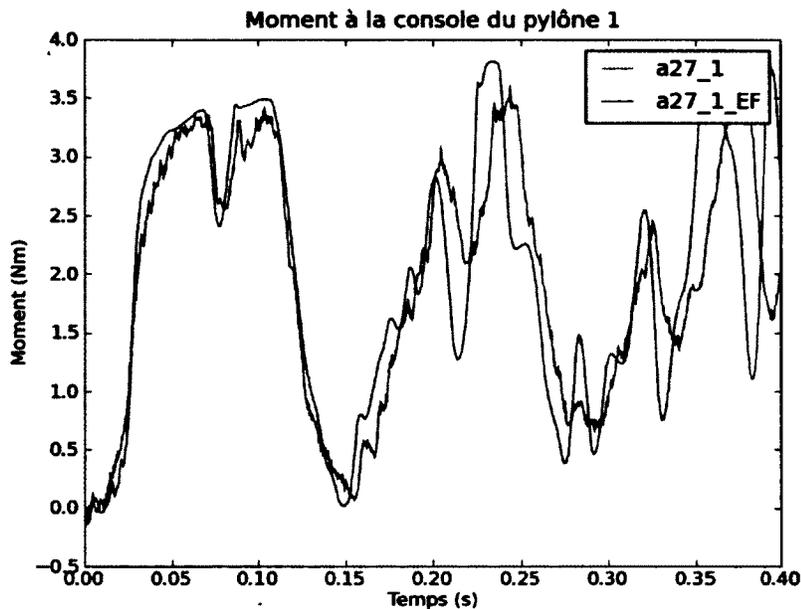


Figure 5.25 Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A27

**Domaine 3** Lors du domaine 3 la console subit de grandes déformations plastiques ainsi que de grands déplacements. Les rotations de la console vont jusqu'à 70 degrés. L'élément représentant l'entaille est donc fortement distordue. Les rotations des consoles selon le modèle d'éléments finis sont présentées à la Figure 5.30. Les Figures 5.26, 5.27, 5.28 et 5.29 présentent la réponse de la console au pylône 1 pour différentes entailles. Les différentes configurations présentent tout une réponse consistante pour la première pointe, ce qui confirme la capacité de l'élément multi-fibre à représenter la réponse d'une section se déformant plastiquement en flexion ainsi qu'en grand déplacement, même dans les cas sévères tel que celui du cas A20[0.81mm]. Les limitations de l'élément au niveau des grandes rotations doivent donc être atténuées par le fait que la console se déplace que dans le plan X-Y, limitant ainsi les problématiques de cumul des rotations.

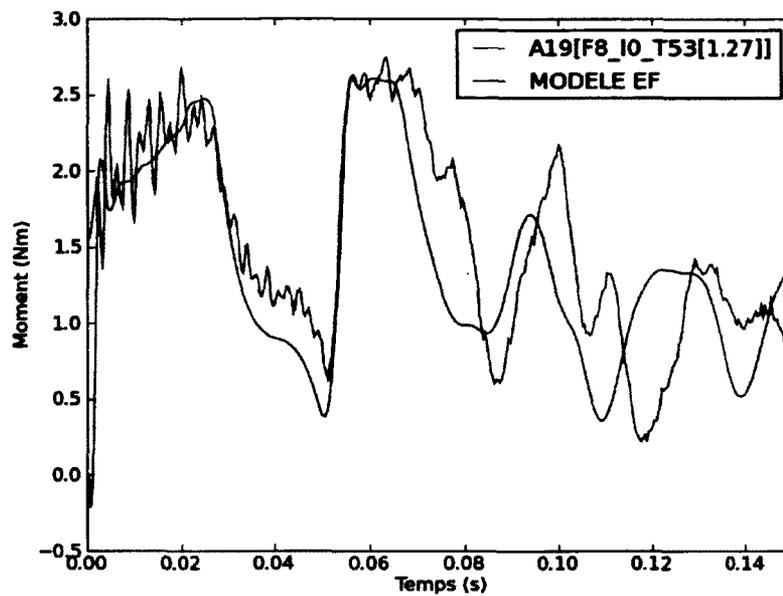


Figure 5.26 Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A19

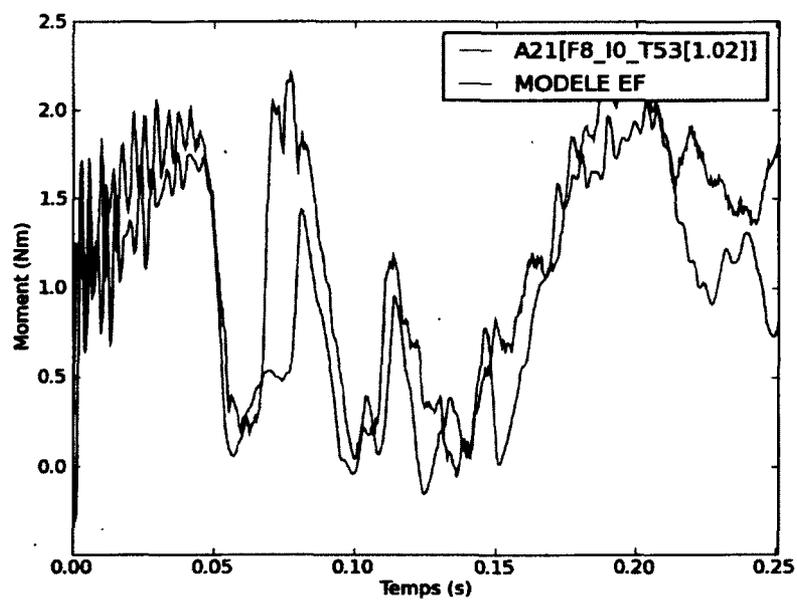


Figure 5.27 Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A21

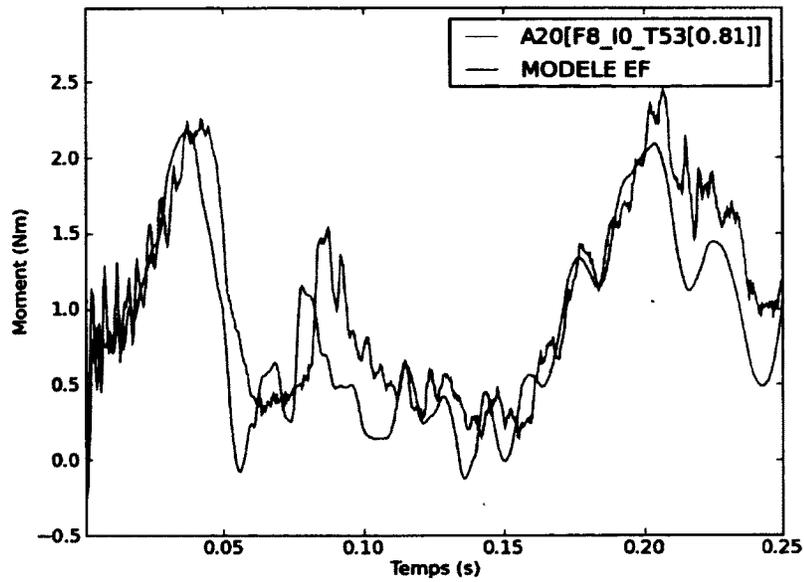


Figure 5.28 Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A20

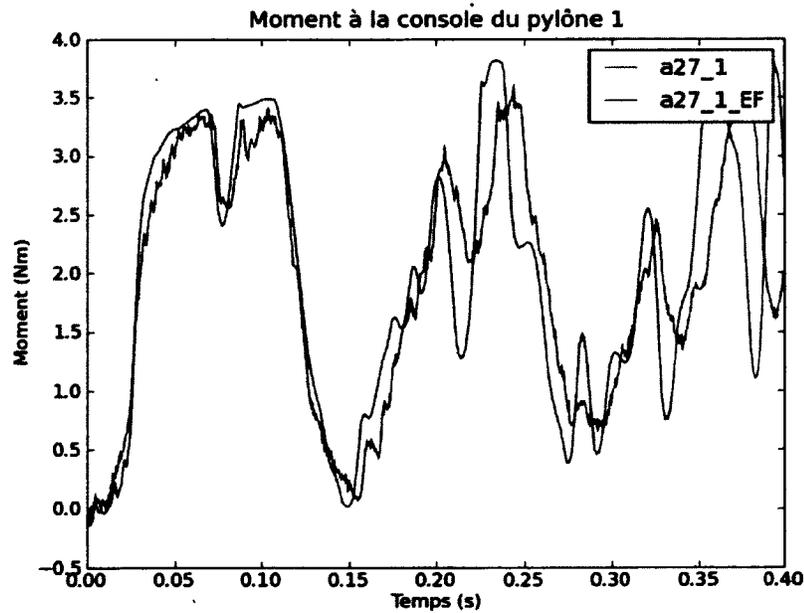


Figure 5.29 Réponse dynamique à la console du pylône 1 pour la modélisation par éléments finis - Cas A27

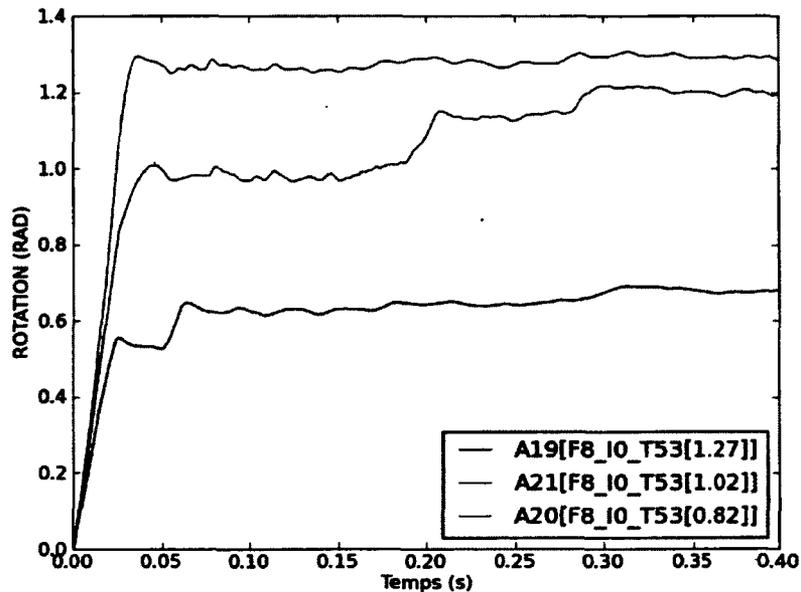


Figure 5.30 Comparaison des rotations de console entre les modèles du domaine 3

En conclusion, la réponse du système avec console fusible répond aux attentes. La formulation des éléments utilisés pour la représentations des non-linéarités géométriques et matériaux est suffisamment robuste pour permettre l'atteinte des objectifs de modélisations. De plus, leurs utilisations est simple ; la poutre multi-fibre ne requiert le calcul d'aucun paramètre, il ne faut fournir que la géométrie. La résolution du système dynamique à l'aide d'un schéma d'intégration HHT- $\alpha$  avec un coefficient de -0.3 permet la convergence des calculs sans l'introduction d'un amortissement numérique marqué. Il est donc possible de représenter adéquatement la réponse d'un canton avec l'ajout d'une console ductile.



# CHAPITRE 6

## MODÉLISATION D'UN CANTON

### 6.1 Définition du problème étudié

Le problème proposé est celui d'un canton de portiques d'acier tubulaires subissant le bris d'un des 3 conducteurs. L'objectif principal de cette modélisation est d'étudier sommairement l'effet de l'ajout d'un mécanisme ductile à la console sur le moment à la base des structures. Elle se veut comme étant une exploration de la méthode.

#### 6.1.1 Géométrie du canton

Afin de valider l'effet de l'ajout d'un fusible ductile sur une configuration réelle, un canton de 10 structures composés de 2 structures d'arrêt rigides et 8 structures de suspensions flexibles ayant une portée de 180 m a été modélisée. Les propriétés du canton sont présentés au Tableau 6.1. Les réglages des conducteurs et câbles de garde sont présentés au Tableau 6.2.

Tableau 6.1 Propriétés du canton à l'étude

Portée	180 m
Nb portée	9
Portique	Tubulaire acier
Isolateurs	1.6 m

Tableau 6.2 Propriétés des conducteurs et câbles de garde

Conducteurs	
Type	ACSR A1S1A 54/7
Tension à nu	19 kN
Câbles de garde	
Type	Acier 9.1 mm
Tension à nu	10 kN

### 6.1.2 Modèle du portique

Pour simplifier l'entrée des données, un portique tubulaire en acier a été conçu. La Figure 6.1 présente la géométrie du portique. La section tubulaire du portique est de 500 mm de diamètre et a une épaisseur de 4.8 mm. Pour simplifier le modèle la section est constante. La traverse est modélisée par une section de HSS de 120 mm de diamètre et a une épaisseur de 10 mm. Les contreventements ainsi que les tirants de tête sont des cornières de 102mm x 102mm x 4.8 mm. La section réduite à la console est représentée par une plaque en acier d'une limite élastique de 350 MPa. Quatre configurations ont été étudiées soient : sans section réduite, 25 mm, 37 mm et 45 mm. Le mécanisme fusible ductile a été ajouté à l'extrémité de la traverse pour tous les portiques du modèle.

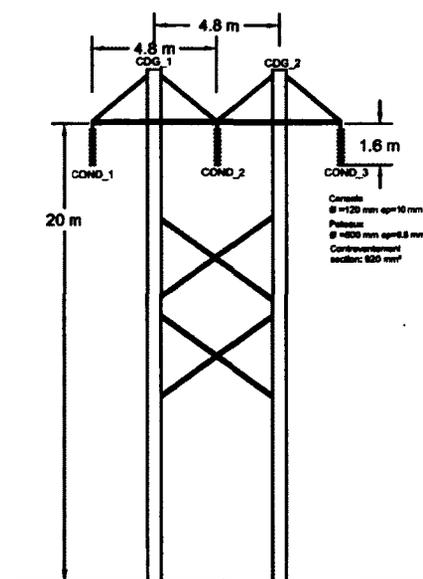


Figure 6.1 Géométrie du portique de suspension

#### Utilisation des Éléments finis

Le modèle comporte les mêmes éléments que ceux utilisés dans le Chapitre 5. La traverse ainsi que les poteaux sont modélisés à l'aide d'éléments poutres multifibres. Les tirants de tête ainsi que les contreventements sont modélisés à l'aide d'éléments câbles dont la rigidité a été modifiée pour être la même en traction qu'en compression.

La différence avec le modèle présenté au Chapitre 5 est l'utilisation du contact avec le sol. La formulation utilisée pour ce modèle est présentée au document suivant : [ABBAS, 2011]. La méthode utilisée permet le traitement du problème du contact unilatéral exact sans frottement avec la méthode des contraintes actives. L'utilisation de cette méthode

permet une résolution rapide et simple du contact entre le sol et le conducteur. Une surface maître représentant le sol est donc définie et la vérification de la non interpénétration avec les noeuds des conducteurs est donc vérifiée. Dans cette formulation le sol n'a donc pas besoin d'être maillé finement. D'autres méthodes disponibles permettent l'utilisation d'un coefficient de friction, par contre le choix de la valeur du coefficient de friction entre le sol et le câble n'étant pas documenté, aucune friction n'a été prise en compte dans cette étude. La Figure 6.2 présente un exemple d'un conducteur en contact avec le sol.

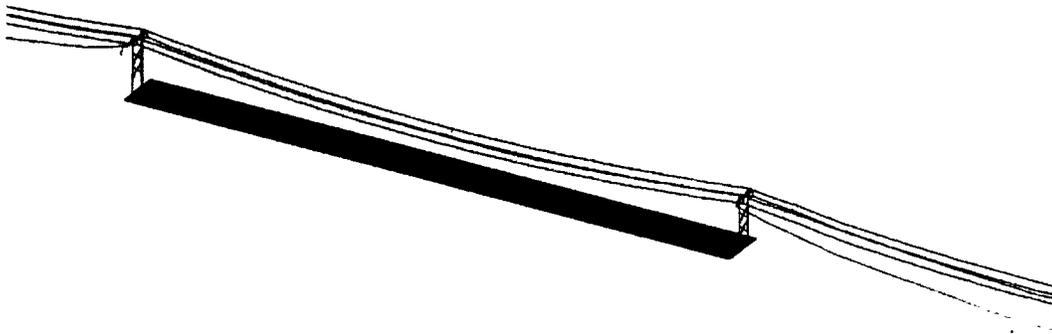


Figure 6.2 Zone de bris du conducteur entre les pylônes 2 et 3 - conducteur en contact avec le sol

La modélisation a été effectuée en deux étapes. Premièrement, la mise en flèche des conducteurs est effectuée de façon statique sur le modèle sans bris. Par la suite, un nouveau maillage est fourni, un élément câble ayant été retiré du modèle pour simuler le bris. L'équilibre des déplacements et des efforts interne du canton sans bris est projeté sur le canton avec bris. Ces conditions servaient de conditions initiales lors de l'analyse dynamique transitoire. La Figure 6.3 présente la zone de bris du modèle. À la Figure 6.4, il est possible d'apercevoir la réponse dynamique du conducteur suivant le bris.



Figure 6.3 Zone de bris du conducteur entre les pylônes 2 et 3

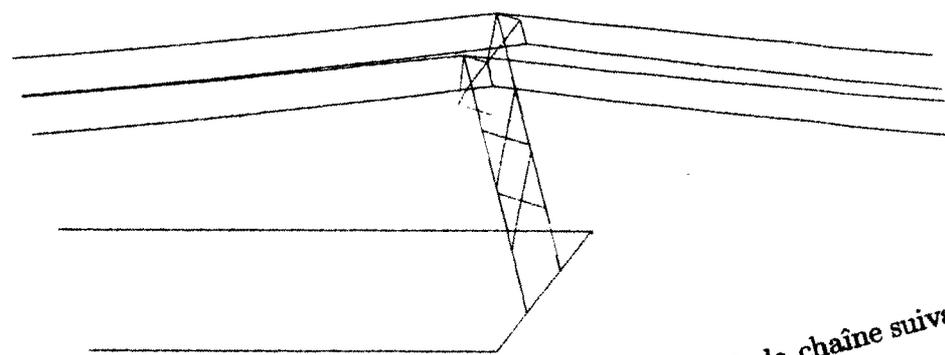


Figure 6.4 Réponse dynamique du conducteur et de la chaîne suivant le bris

## 6.2 Résultats

Pour chacun des modèles, les efforts à la base des poteaux ont été évalués. De plus, le nombre de pylônes ayant subi une plastification du mécanisme a été évalué. La Figure 6.5 présente la réponse en moment à la base des trois portiques suivant le bris pour le cas de référence. Sur cette figure, la valeur du moment maximal à la base des poteaux est de 234 kNm, cette valeur servira de référence pour évaluer le rendement des différentes configurations de fusibles. La réponse dynamique de ce canton suite au bris présente deux points de traction principales. Le mécanisme utilisé devra donc être en mesure de réduire ces deux points de traction pour atteindre un rendement intéressant.

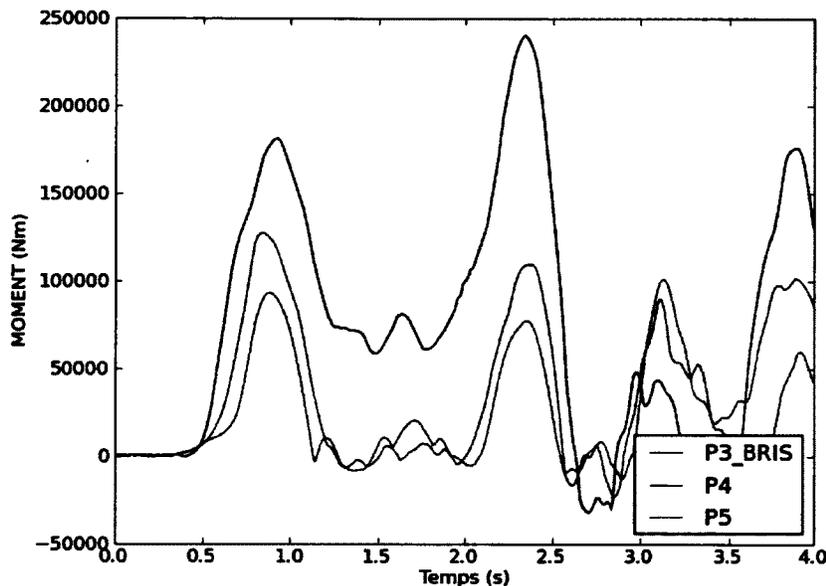


Figure 6.5 Réponse dynamique transitoire des pylônes 3, 4 et 5 - Cas de référence

### 6.2.1 Modèle avec plaque de 45 mm

La réponse du système avec l'insertion d'une plaque de 45 mm est présentée à la Figure 6.6. Le mécanisme ductile à la console permet la réduction des deux premières points de flexion à la base des pylônes. Le moment maximal obtenu est de 201 kNm pour une réduction de près de 15%. Le Figure 6.7 présente les contraintes maximales aux sections réduites des pylônes 3, 4 et 5. Pour la plaque de 45 mm, seule la première section semble

subir des déformations plastiques. À titre indicatif, la déformation finale de la console est présentée à la Figure 6.8.

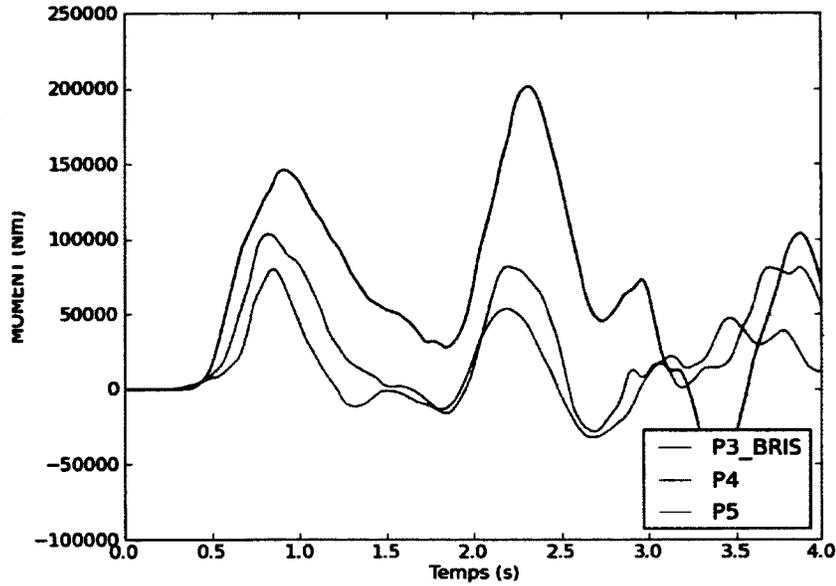


Figure 6.6 Réponse dynamique transitoire des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 45 mm

6.2. RÉSULTATS

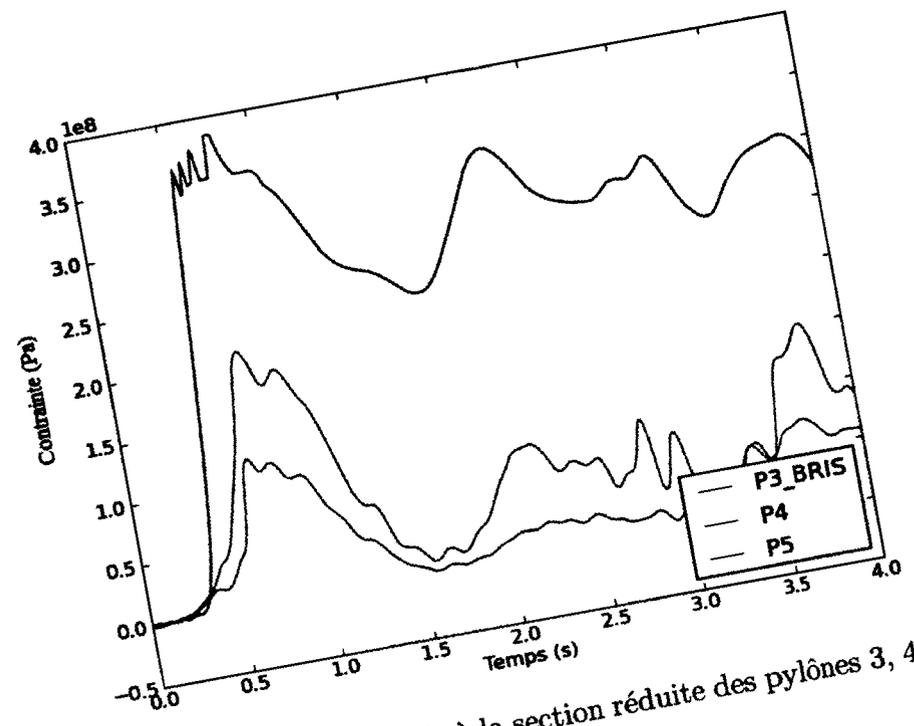


Figure 6.7 Contrainte maximale à la section réduite des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 45 mm

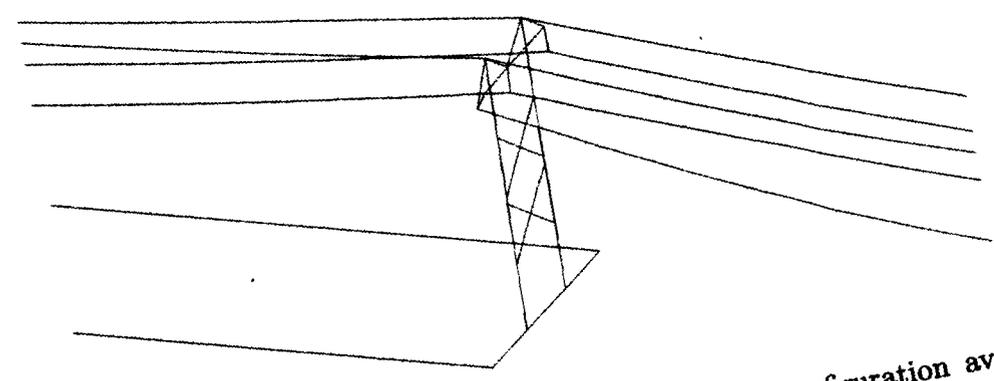


Figure 6.8 Déformation de la console au pylône 3 - configuration avec une section de 45 mm

### 6.2.2 Modèle avec plaque de 25 mm

L'utilisation d'une plaque de 25 mm modifie la réponse dynamique du canton, la Figure 6.9 présente la réponse transitoire des pylônes 3, 4 et 5. Sur cette figure une diminution marquée des efforts à la base du pylône 3 a été observable. Le moment diminue de 32% pour atteindre 159 kNm. Par contre, les trois consoles fusibles suivant le bris sont endommagées, la Figure 6.10 présente les contraintes obtenues. L'endommagement des consoles est un problème car, il oblige un travail supplémentaire pour la remise en service de la ligne. À titre indicatif, la Figure 6.11 présente la déformation de la console. Sur cette figure on peut percevoir le grand déplacement de la console suivant le bris, ce qui ne s'est pas produit avec la configuration à 45 mm.

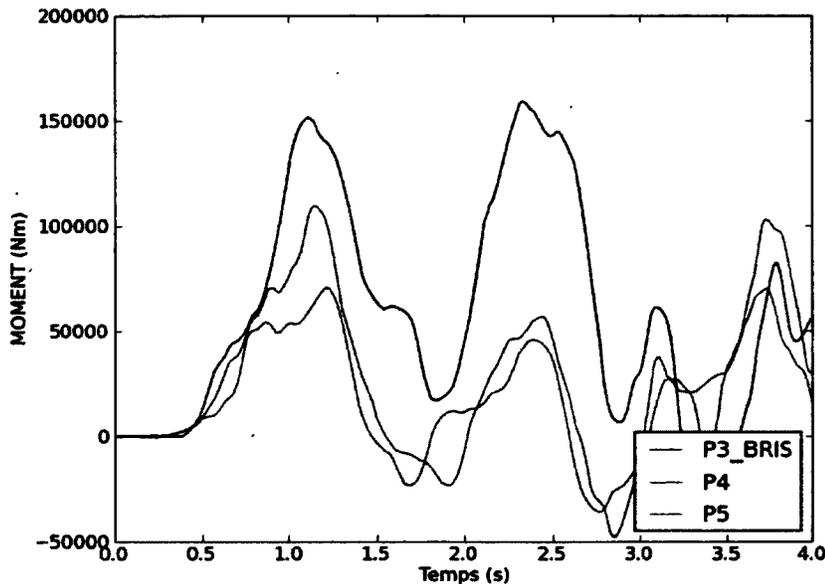


Figure 6.9 Réponse dynamique transitoire des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 25 mm

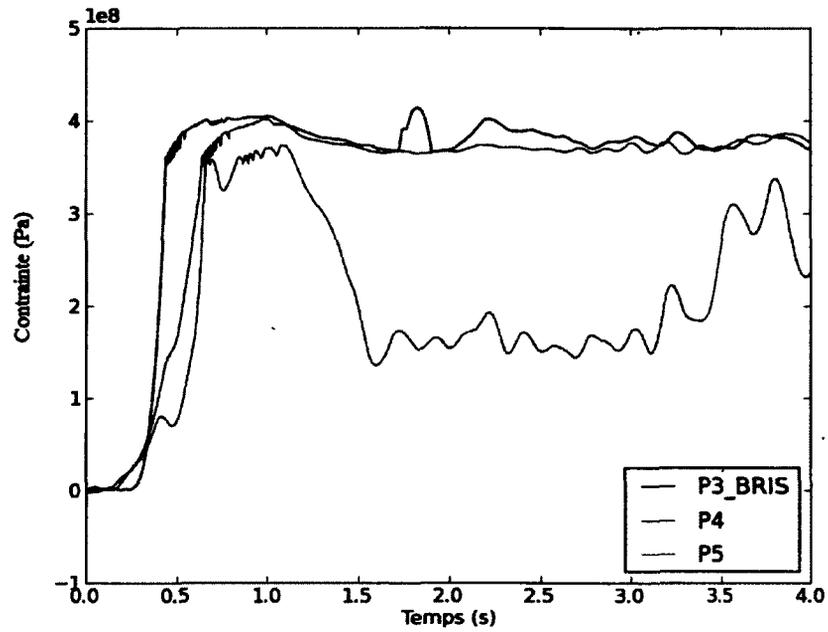


Figure 6.10 Contrainte maximal à la section réduite des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 25 mm

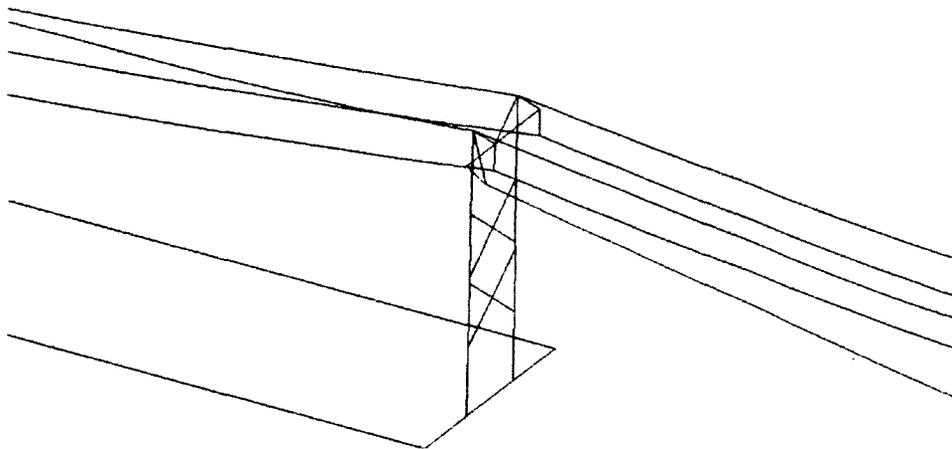


Figure 6.11 Déformation de la console au pylône 3 - configuration avec une section de 25 mm

### 6.2.3 Modèle avec plaque de 37 mm d'épaisseur à la console

La configuration de la console avec une plaque de 37 mm permet une réduction des efforts de 28% à la base du pylône 3. Le moment maximal de 169 kNm est présenté à la Figure 6.12. Contrairement à la plaque de 25 mm, la plaque de 37 mm permet de limiter l'endommagement a un seul pylône, tel que présenté à la Figure 6.13. Ce comportement est particulièrement avantageux pour la remise en service de la ligne suivant le bris, tout en conservant une réduction importante des efforts.

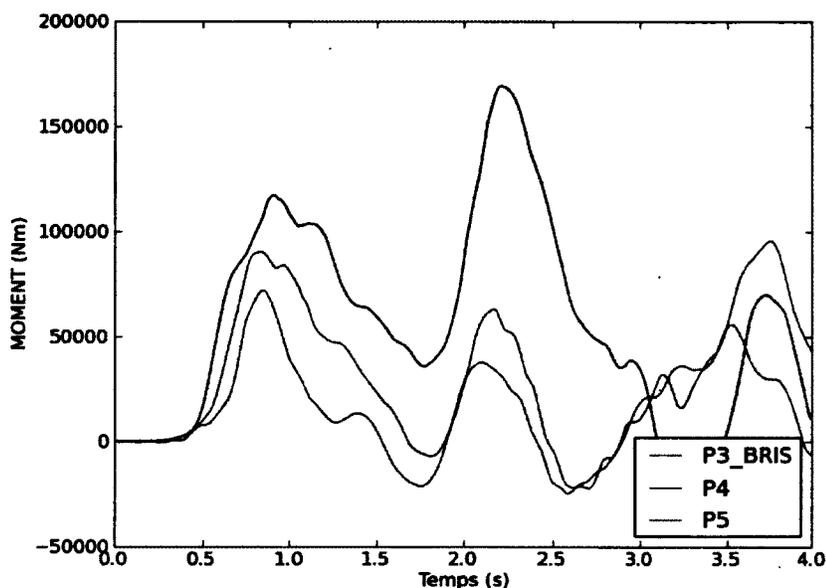


Figure 6.12 Réponse dynamique transitoire des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 36 mm

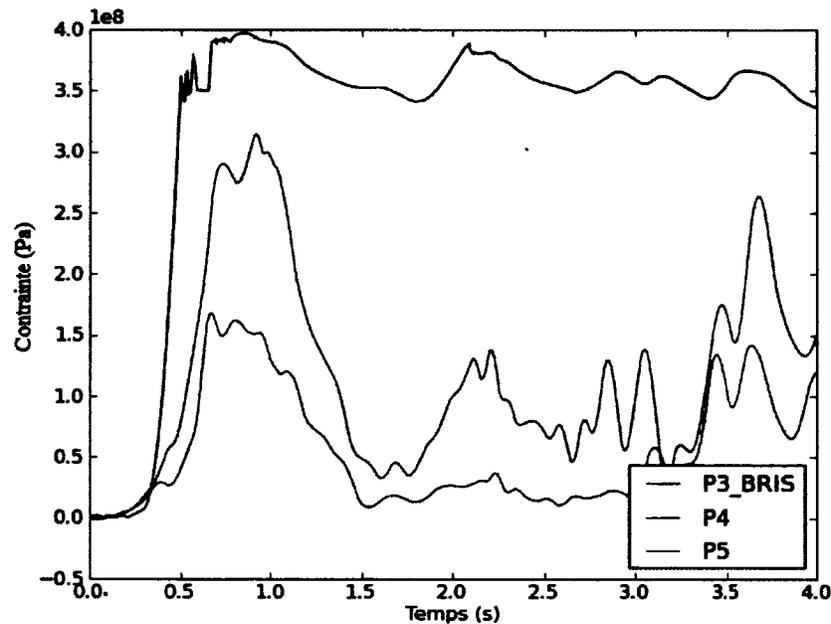


Figure 6.13 Contrainte maximale à la section réduite des pylônes 3, 4 et 5 - Cas avec section de 36 mm

#### 6.2.4 Observations générales

L'ajout d'un mécanisme ductile à la console sur une configuration réelle permet une réduction importante des efforts tel qu'observé avec l'essai à échelle réduit. De plus, la réponse en fonction de la capacité ductile de la console est conforme à celle obtenue en laboratoire. En effet, l'utilisation d'un mécanisme de forte capacité ne réduit que faiblement les efforts. En contrepartie, un mécanisme de trop faible capacité déclenchera une cascade des fusibles sur la ligne, ce qui requièrera une plus grande charge de travail lors de la remise en service. L'utilisation d'un mécanisme optimisé (37 mm) permet une réduction importante des efforts, de 28% sans toutefois générer un endommagement important des structures du canton.



# CHAPITRE 7

## CONCLUSION

Cette étude avait deux objectifs. Le premier objectif était de valider expérimentalement l'effet de l'ajout d'un mécanisme ductile à la console d'un pylône soumis à un bris de conducteur. Le second objectif était de bâtir et de valider une méthode numérique par éléments finis permettant la modélisation d'un canton de ligne soumis à un bris de conducteur avec la présence d'un mécanisme fusible ductile à la console.

Les essais à échelle réduite ont démontré la capacité d'un fusible ductile de réduire les efforts à la base d'un pylône soumis à un bris de conducteur. Le pylône de suspension suivant le bris a obtenu une réduction des efforts de l'ordre de 33%. De plus, une réduction globale des efforts du canton de 25% a été observée. L'étude a permis de démontrer que le choix de la capacité du mécanisme était très critique, un fusible de grande capacité n'apportant aucune réduction, mais plus important, un fusible de trop faible capacité reporte les efforts obtenus au pylône suivant, pouvant par le fait même causer le déclenchement en cascade des mécanismes.

Le modèle par éléments finis mis au point à l'aide du logiciel Code-Aster a été validé selon deux séries de résultats distincts. Premièrement, les essais de Mozer ont permis la validation du modèle à l'aide d'un comportement élastique des pylônes. Le modèle s'est également montré apte à représenter un canton subissant la plastification du câble de garde. Les résultats obtenus dans cette configuration ont démontré un très faible écart avec les essais.

Deuxièmement, le modèle a été confronté aux essais à échelle réduite. En premier lieu, les essais avec comportement élastique du pylône ont permis de confirmer le bon fonctionnement du modèle avec une erreur variant de 5 à 10%. Par la suite, l'ajout d'un mécanisme ductile à la console a permis de valider l'approche ainsi que les éléments utilisés dans la représentation du comportement dynamique non linéaire d'un pylône. L'erreur avec les résultats de laboratoire étant de 10 à 20%, et considérant que les essais élastiques possédaient un erreur de 5 à 10%, il est donc possible d'affirmer que le modèle permet la représentation du comportement non linéaire d'un pylône avec mécanisme ductile.

Les objectifs de ce projet de recherche ont donc été atteints. Il est donc maintenant possible d'étudier l'effet de l'ajout d'un mécanisme ductile sur des configurations données de

pylône. Une étude est maintenant requise pour permettre d'évaluer le gain économique potentiel de l'utilisation d'un fusible sur une ligne électrique. De plus, le comportement du mécanisme ductile devra être analysé avec les divers cas de charges normalisés utilisés dans la conception d'une ligne de transport pour garantir que son fonctionnement ne causera aucun problème durant l'utilisation courante du pylône.

Cette étude ouvre donc la porte à une conception post-élastique d'un pylône. L'objectif ultime étant de contrôler les déplacements et les efforts post-rupture au lieu de subir une ruine, permettant du fait même de limiter le temps de remise en service d'une ligne, ainsi que les coûts de reconstruction. La complexité d'un tel modèle n'est pas réalisable pour le moment, mais l'avancement des méthodes de modélisation étant tel, que dans un futur rapproché, il est pensable de croire que des outils seront disponibles aux ingénieurs en ligne de transport pour permettre la mise en place d'un tel concept.

# ANNEXE A

## Annexe A

Table F-5

TRACE CALIBRATION FACTORS FOR SERIES E MODEL TESTS

Test	Arm Load (Horizontal) (lb/mm.)	Ground-Line Moment (in-lb/mm.)	Test	Arm Load (Horizontal) (lb/mm.)	Ground-Line Moment (in-lb/mm.)
E2	0.52	28.0	E30	0.50	20.0
E3	"	"	E31	0.49	19.7
E4	0.48	19.5	E32	0.50	20.6
E5	"	"	E33	0.49	19.7
E6	"	"	E34	0.50	20.6/41.0
E7	"	"	E35	"	"
E8	"	"	E36	"	20.0
E9	"	"	E37	"	20.6
E10	"	"	E38	"	20.8
E11	0.47	"	E39	"	"
E12	"	"	E40	0.48	-
E13	"	"	E41	"	-
E14	0.50	20.0	E42	"	-
E15	"	"	E43	"	-
E16	"	"	E44	"	-
E17	"	"	E45	"	-
E18	0.51	18.0	E46	"	-
E19	"	"	E47	"	-
E20	"	19.5	E48	0.52	-
E21	"	"	E49	"	-
E22	"	19.5/20.5	E50	"	-
E23	"	41.0	E51	"	-
E24	"	20.5	E52	0.49	19.9
E25	"	19.5	E53	"	"
E26	"	"	E54	0.50/0.25	19.9/10.0
E27	0.50	20.6	E55	0.50/0.25	19.9/10.0
E28	"	"	E56	0.25	10.0
E29	"	"	E57	"	"

1 lb = 4.448 N  
1 in = 25.4 mm

Figure A.1 Grille de correspondances des résultats - [MOZER, 1978]

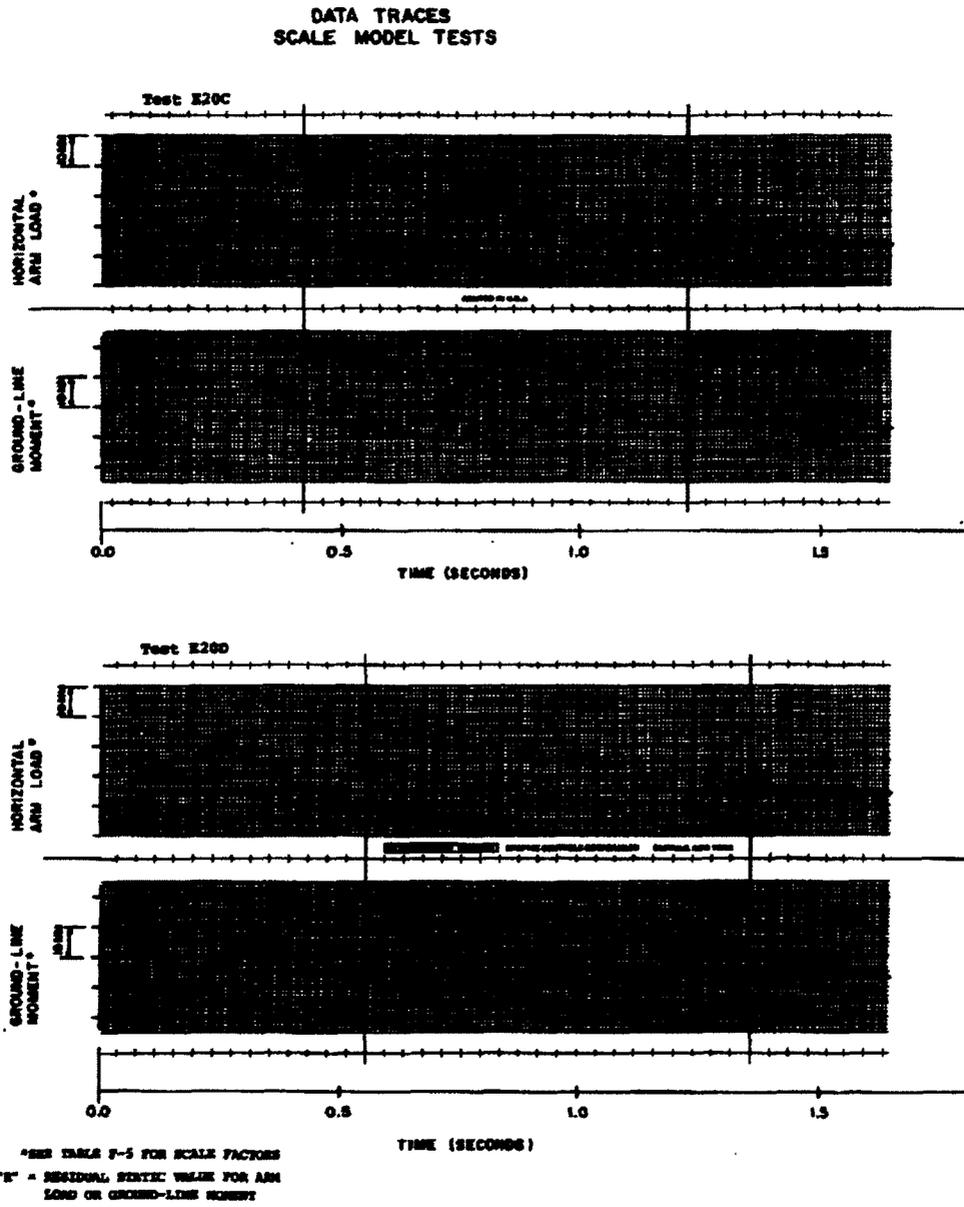


Figure A.2 Réponse transitoire pour le cas E20 - [MOZER, 1978]

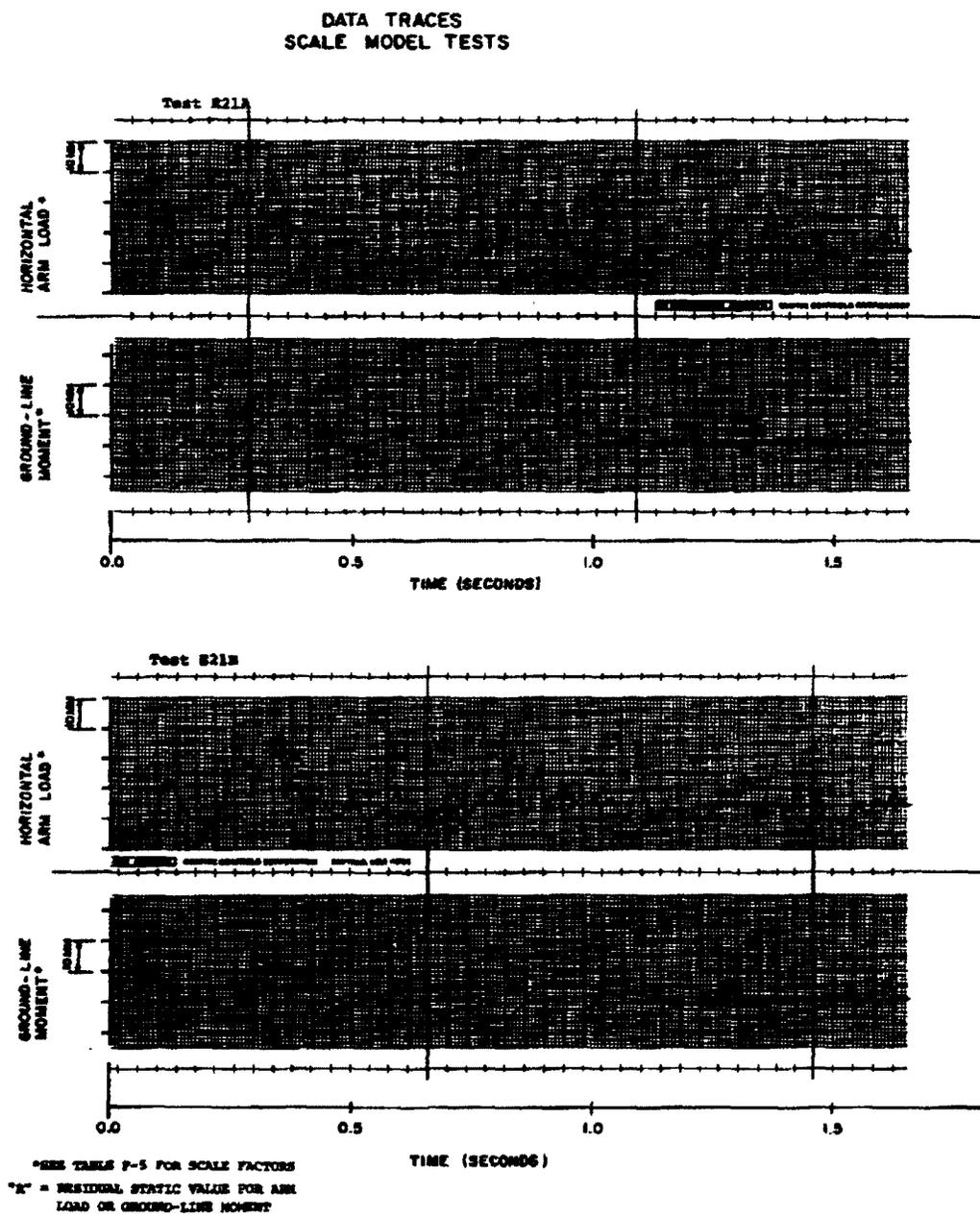


Figure A.3 Réponse transitoire pour le cas E21 - [MOZER, 1978]

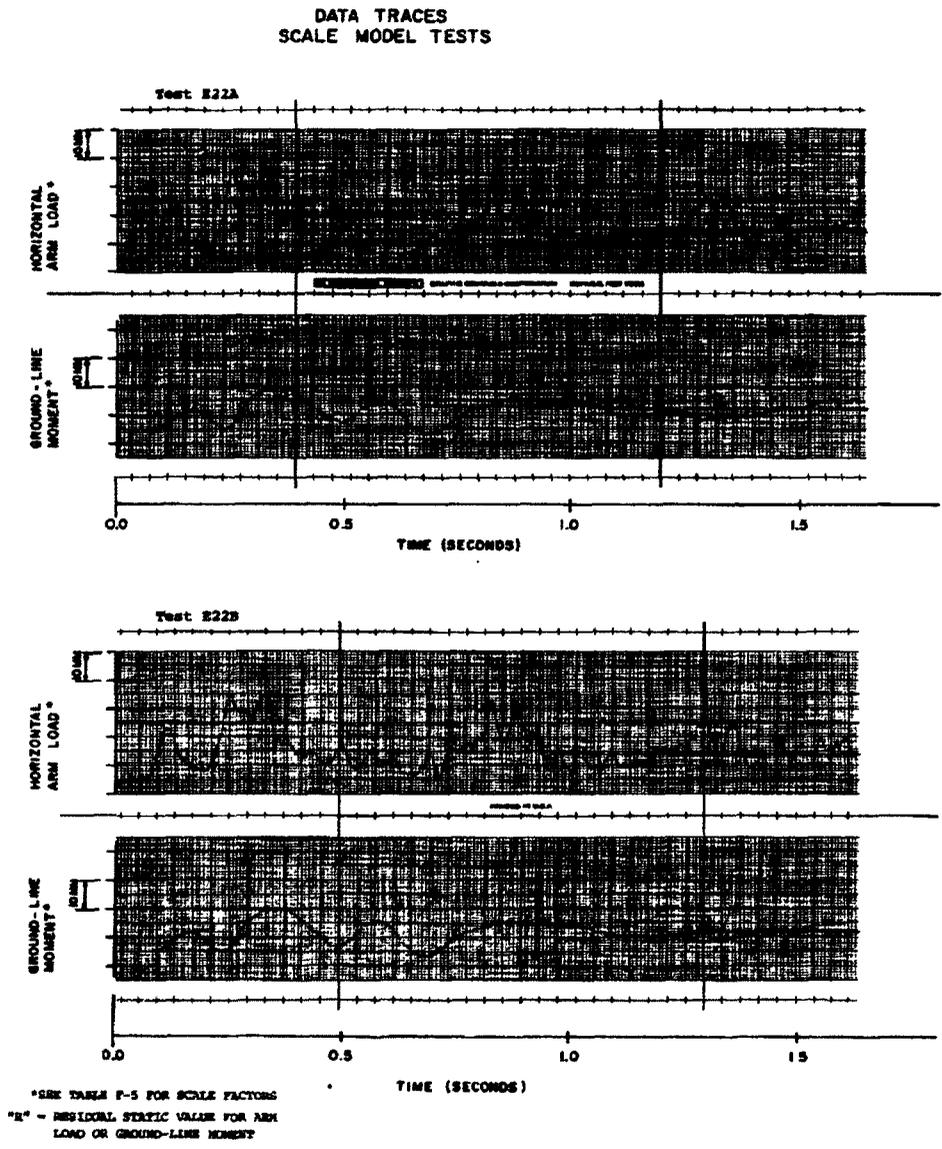
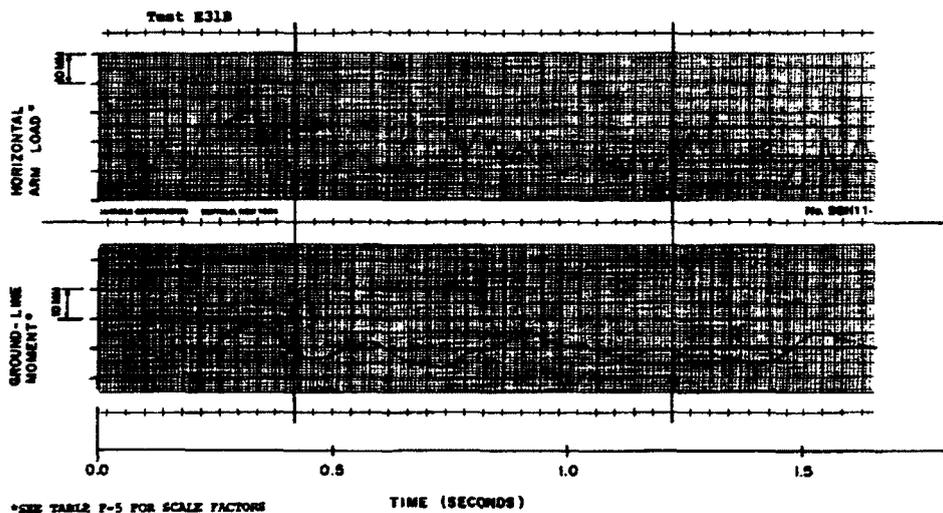
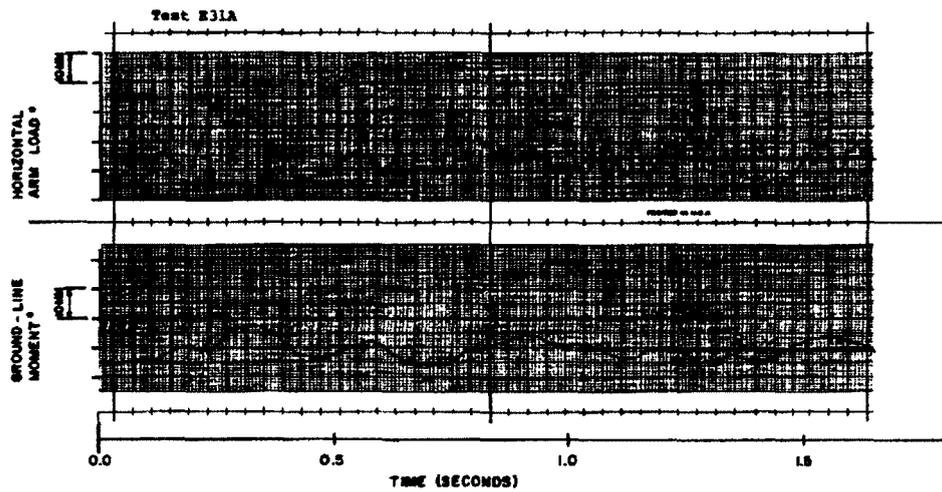


Figure A.4 Réponse transitoire pour le cas E22 - [MOZER, 1978]

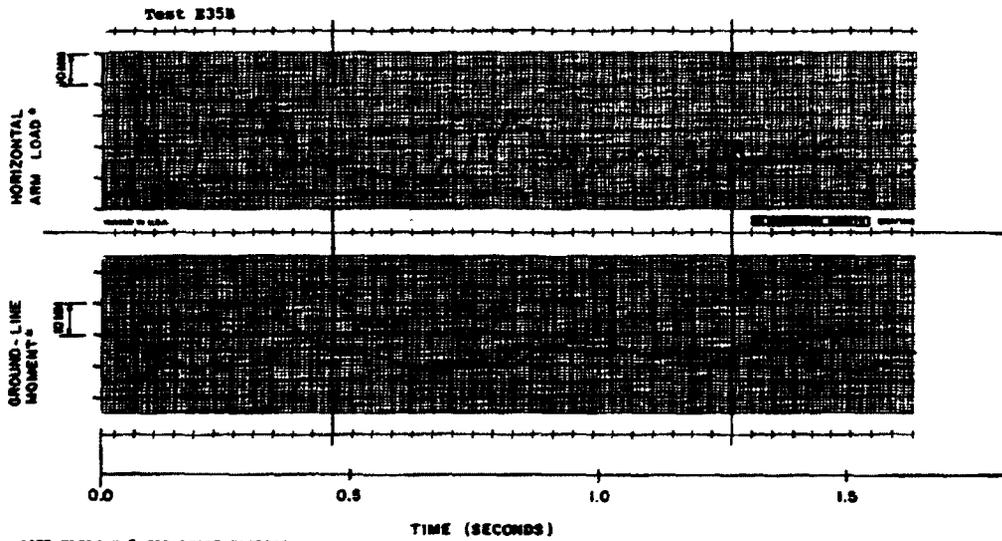
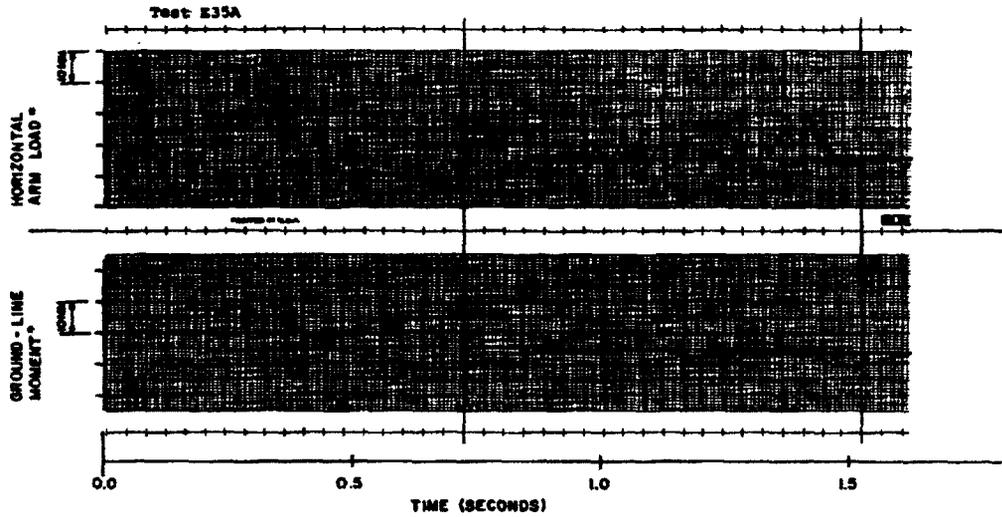
DATA TRACES  
SCALE MODEL TESTS



\*SEE TABLE P-5 FOR SCALE FACTORS  
\*N\* - RESIDUAL STATIC VALUE FOR ARM  
LOAD OR GROUND-LINE MOMENT

Figure A.5 Réponse transitoire pour le cas E31 - [MOZER, 1978]

DATA TRACES  
SCALE MODEL TESTS



\*SEE TABLE F-5 FOR SCALE FACTORS  
"K" - RESIDUAL STATIC VALUE FOR ARM  
LOAD OR GROUND-LINE MOMENT

Figure A.6 Réponse transitoire pour le cas E35 - [MOZER, 1978]

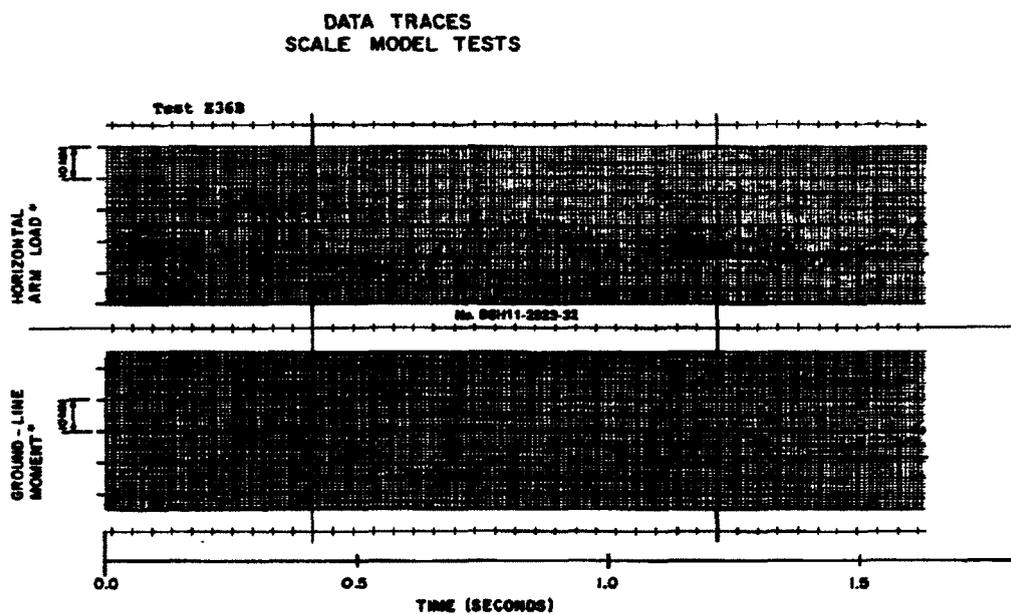


Figure A.7 Réponse transitoire pour le cas E36 - [MOZER, 1978]



# ANNEXE B

## Annexe B

### B.1 Résultats des essais de ruptures de conducteurs

#### B.1.1 Cas A1

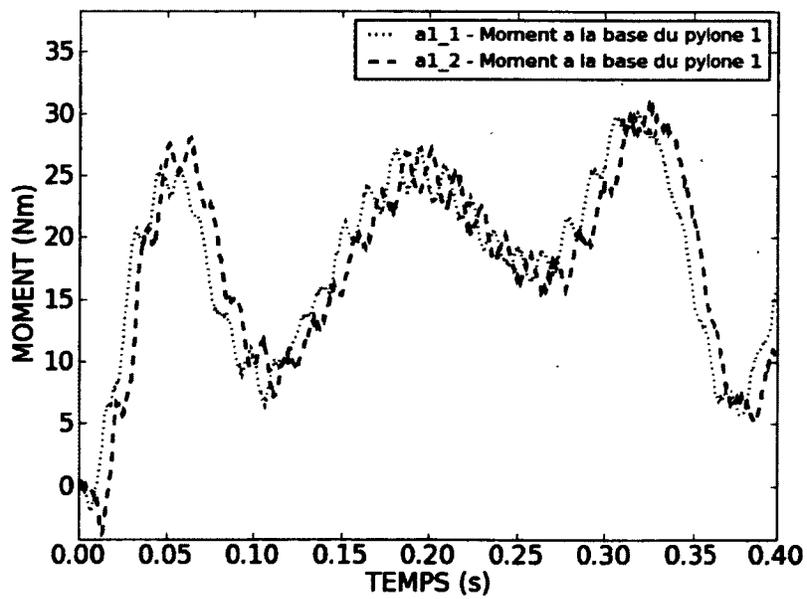


Figure B.1 Moment à la base du pylône 1 - Cas a1-1 et a1-2

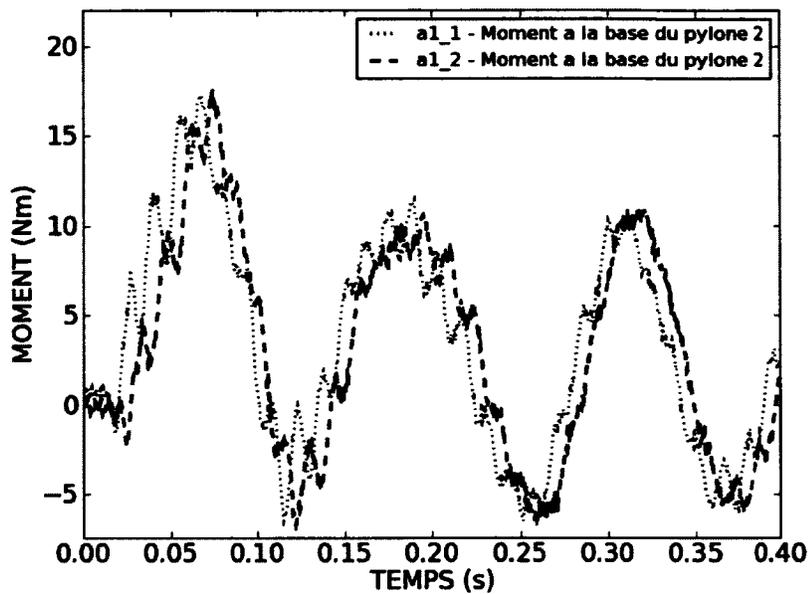


Figure B.2 Moment à la base du pylône 2 - Cas a1-1 et a1-2

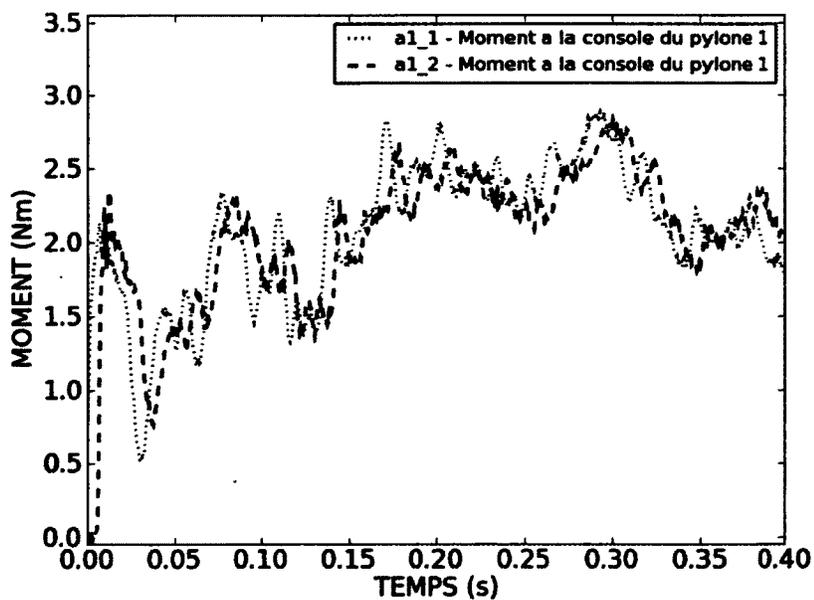


Figure B.3 Moment à la console du pylône 1 - Cas a1-1 et a1-2

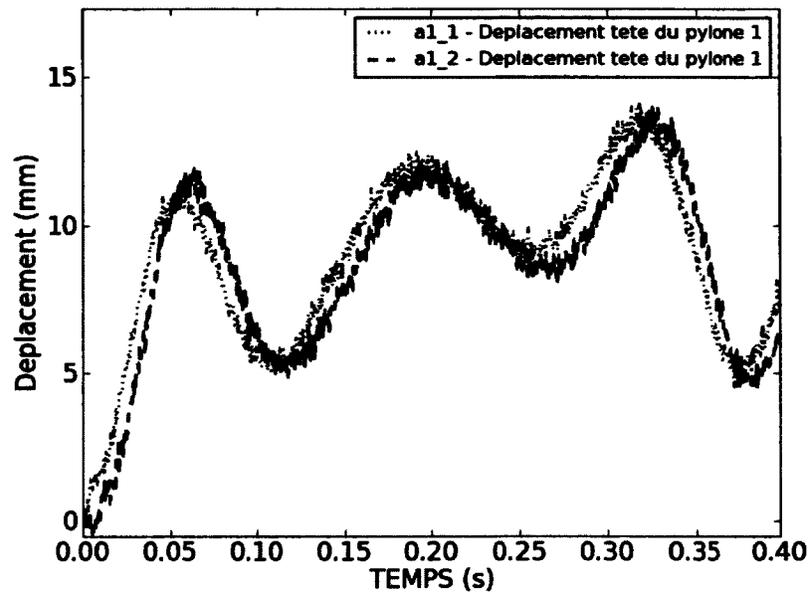


Figure B.4 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a1-1 et a1-2

### B.1.2 Cas A2

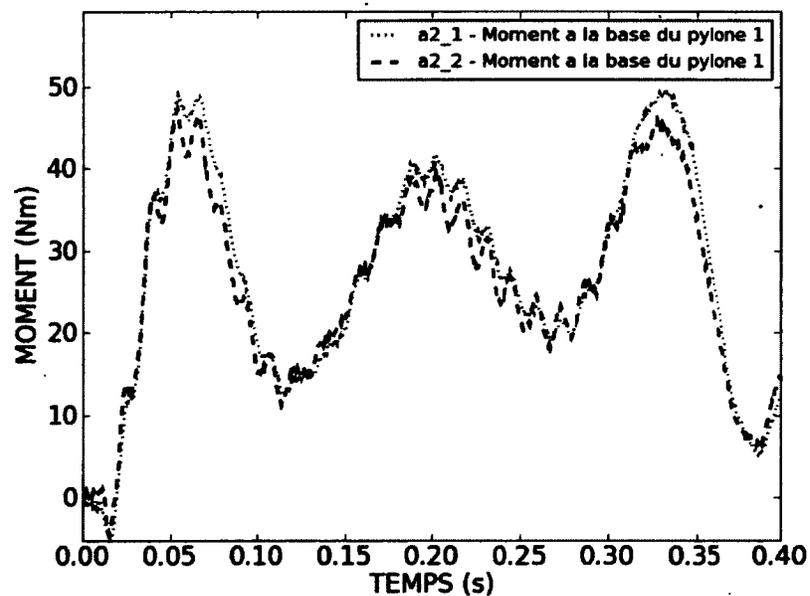


Figure B.5 Moment à la base du pylône 1 - Cas a2-1 et a2-2

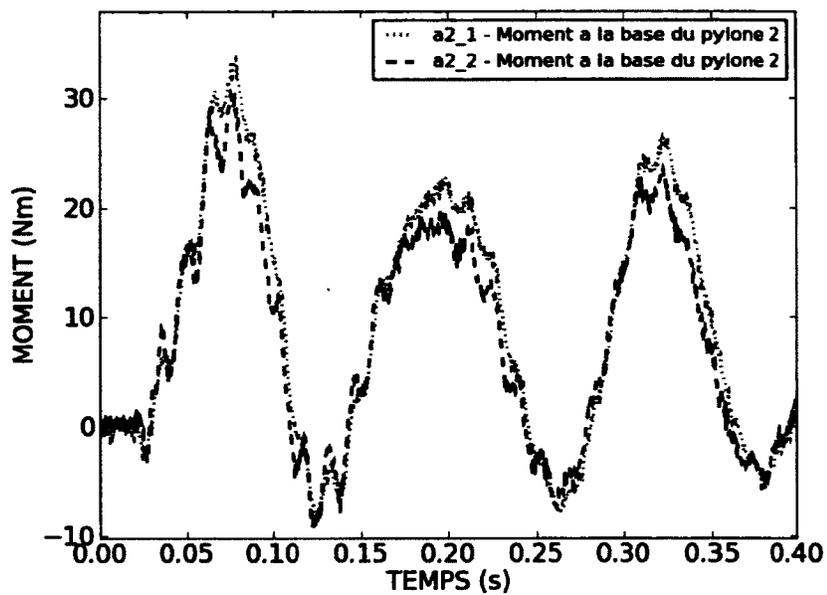


Figure B.6 Moment à la base du pylône 2 - Cas a2-1 et a2-2

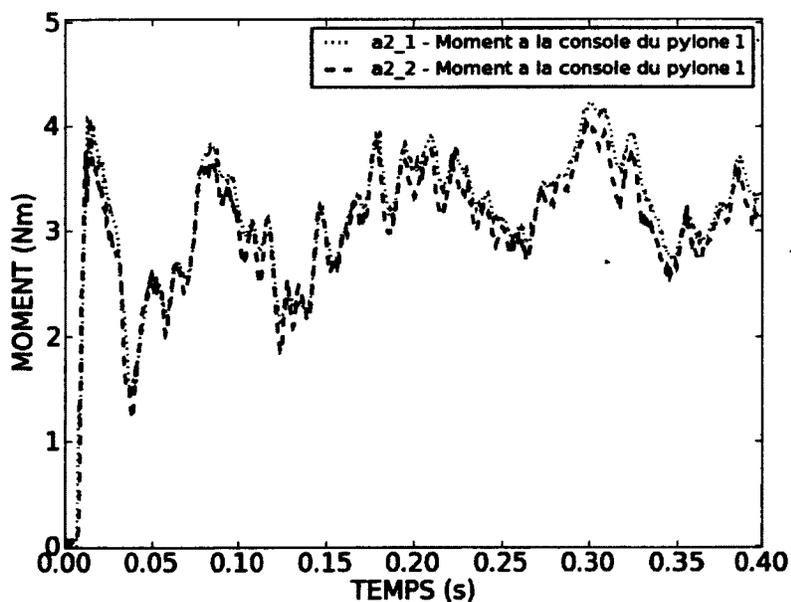


Figure B.7 Moment à la console du pylône 1 - Cas a2-1 et a2-2

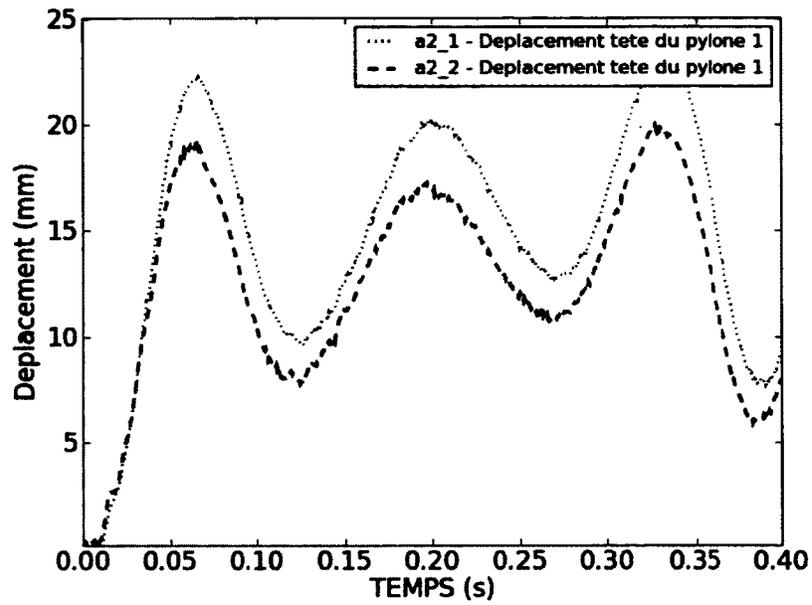


Figure B.8 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a2-1 et a2-2

### B.1.3 Cas A3

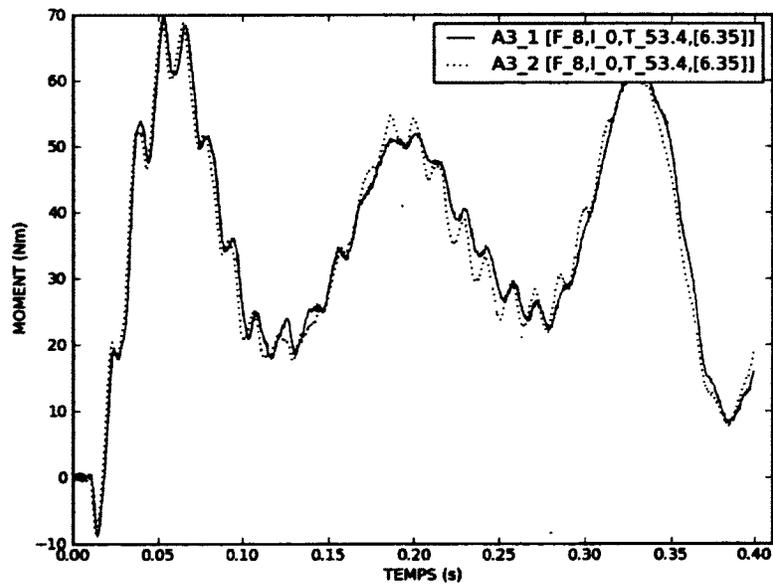


Figure B.9 Moment à la base du pylône 1 - Cas a3-1 et a3-2

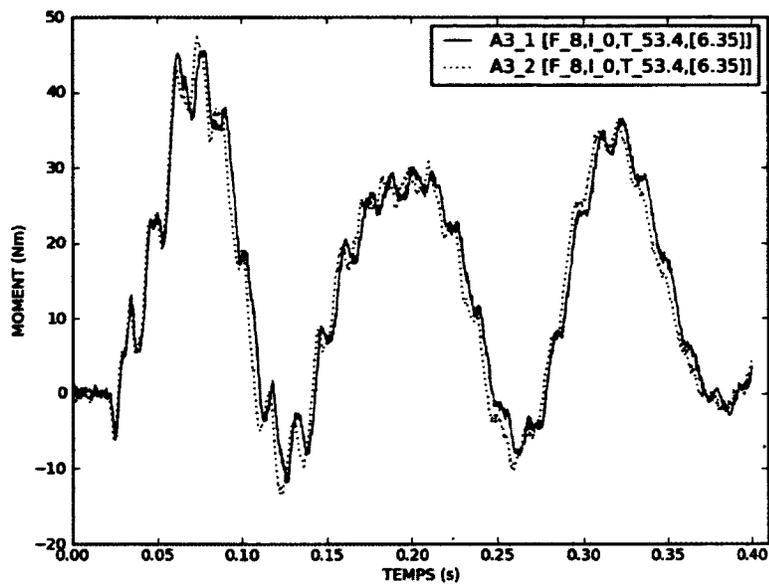


Figure B.10 Moment à la base du pylône 2 - Cas a3-1 et a3-2

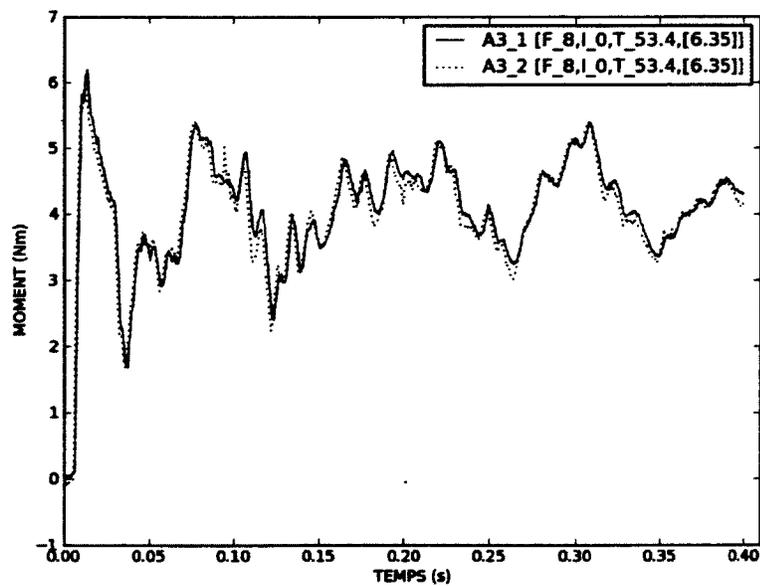


Figure B.11 Moment à la console du pylône 1 - Cas a3-1 et a3-2

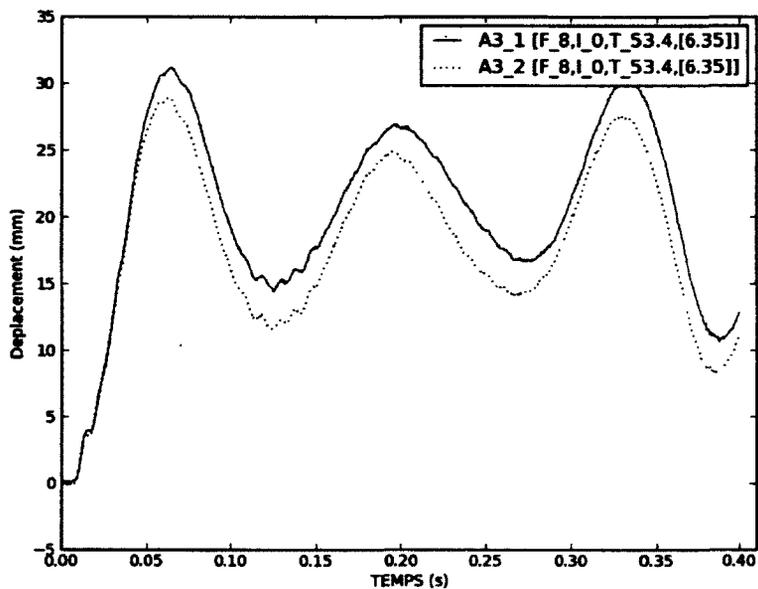


Figure B.12 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a3-1 et a3-2

#### B.1.4 Cas A4

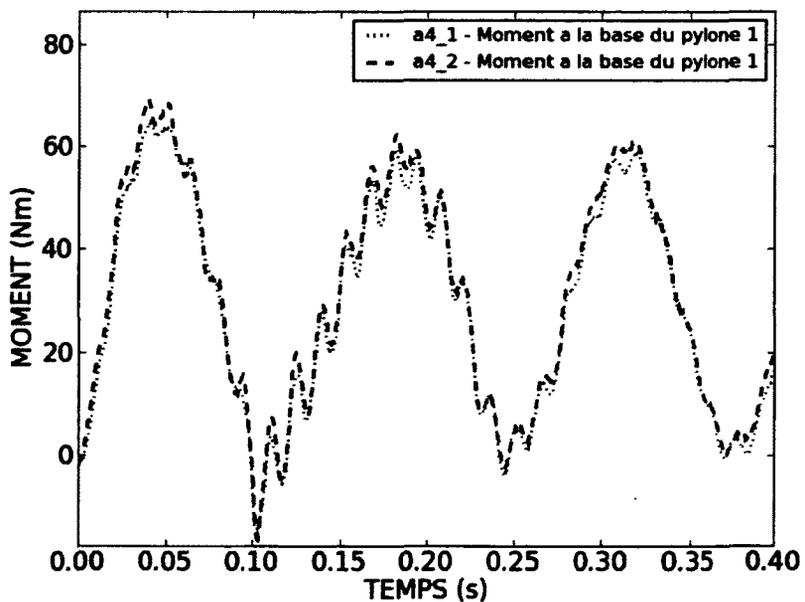


Figure B.13 Moment à la base du pylône 1 - Cas a4-1 et a4-2

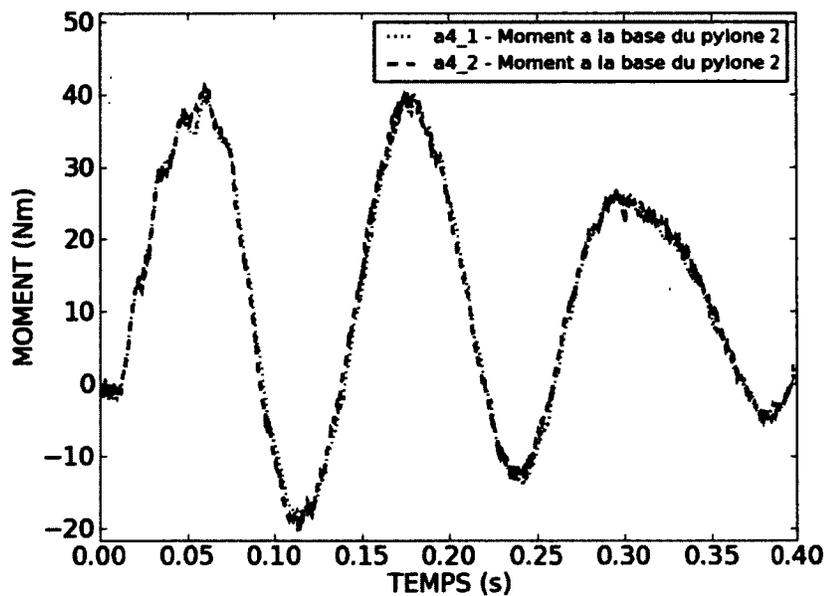


Figure B.14 Moment à la base du pylône 2 - Cas a4-1 et a4-2

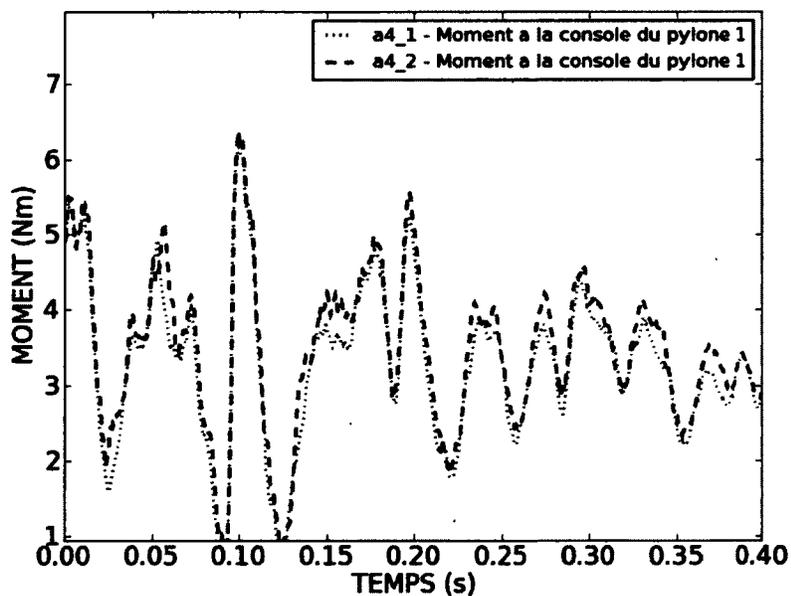


Figure B.15 Moment à la console du pylône 1 - Cas a4-1 et a4-2

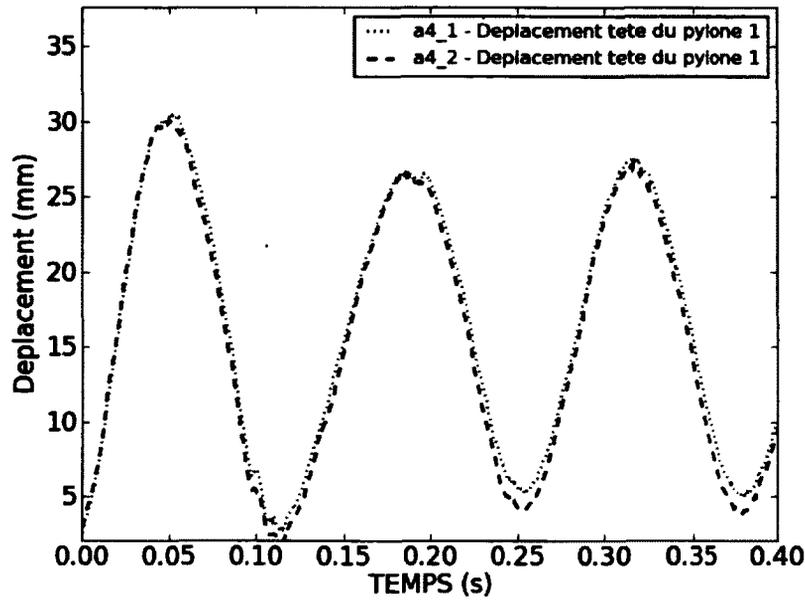


Figure B.16 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a4-1 et a4-2

**B.1.5 Cas A5**

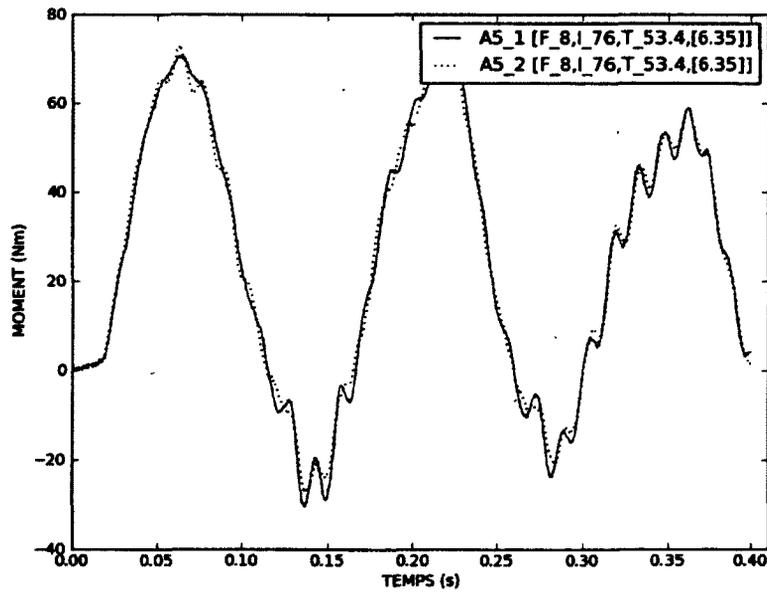


Figure B.17 Moment à la base du pylône 1 - Cas a5-1 et a5-2

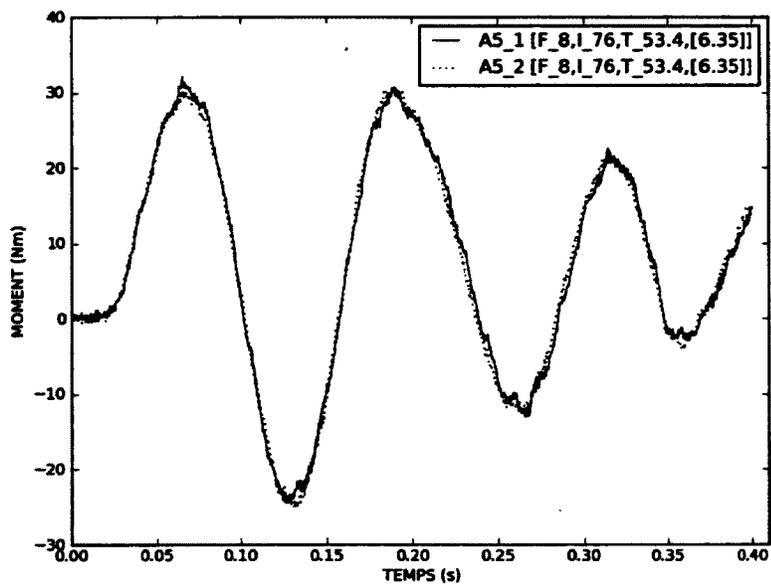


Figure B.18 Moment à la base du pylône 2 - Cas a5-1 et a5-2

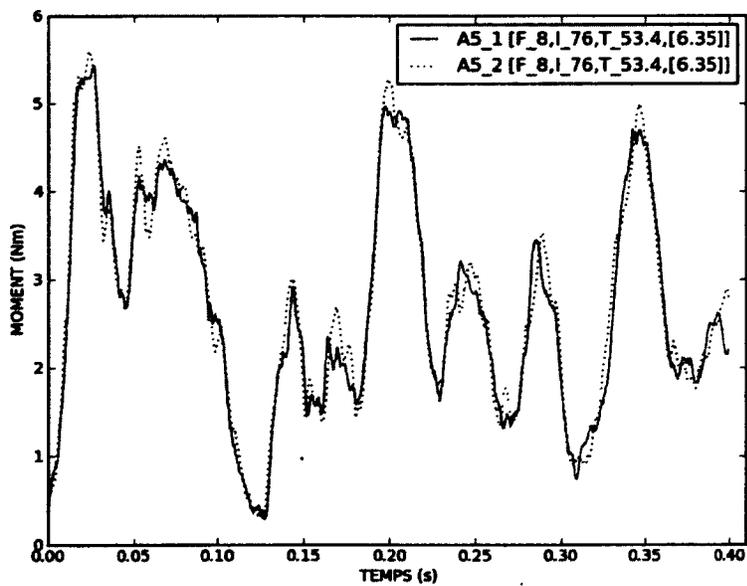


Figure B.19 Moment à la console du pylône 1 - Cas a5-1 et a5-2

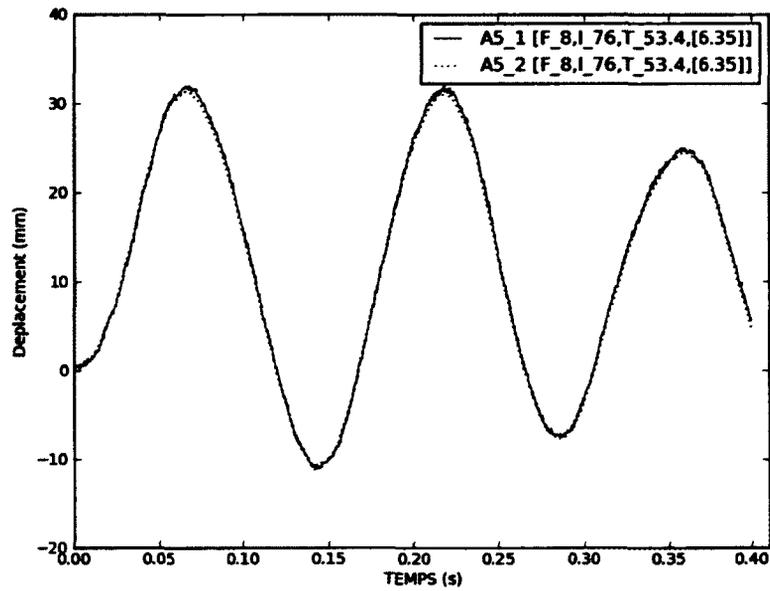


Figure B.20 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a5-1 et a5-2

### B.1.6 Cas A6

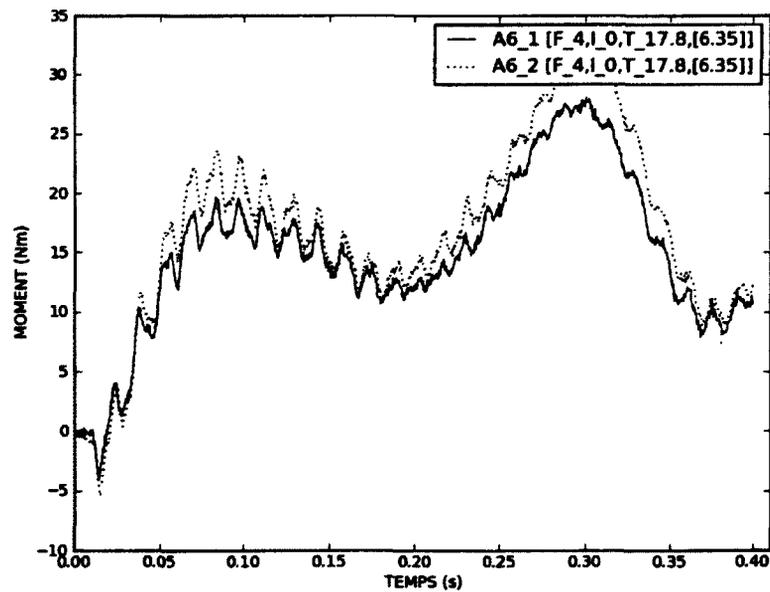


Figure B.21 Moment à la base du pylône 1 - Cas a6-1 et a6-2

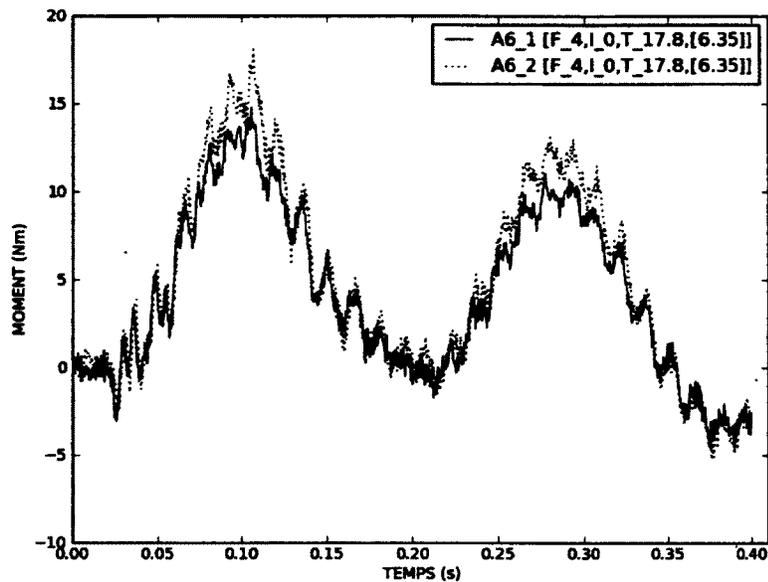


Figure B.22 Moment à la base du pylône 2 - Cas a6-1 et a6-2

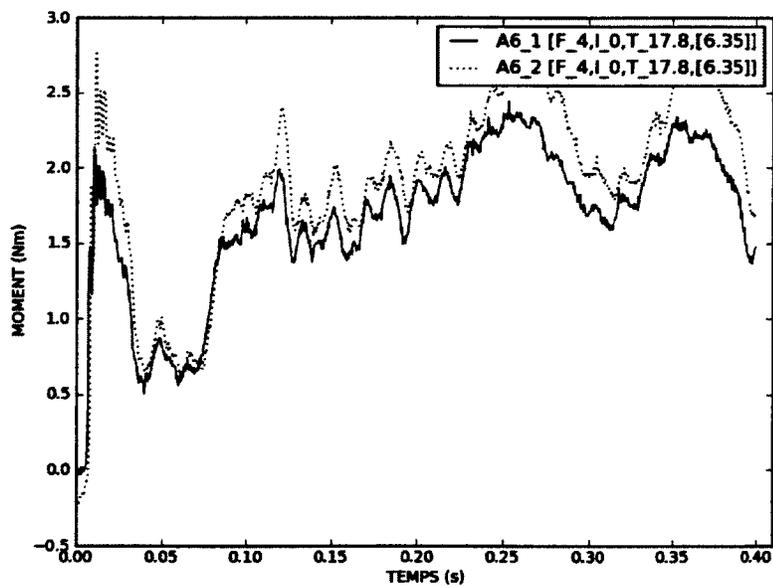


Figure B.23 Moment à la console du pylône 1 - Cas a6-1 et a6-2

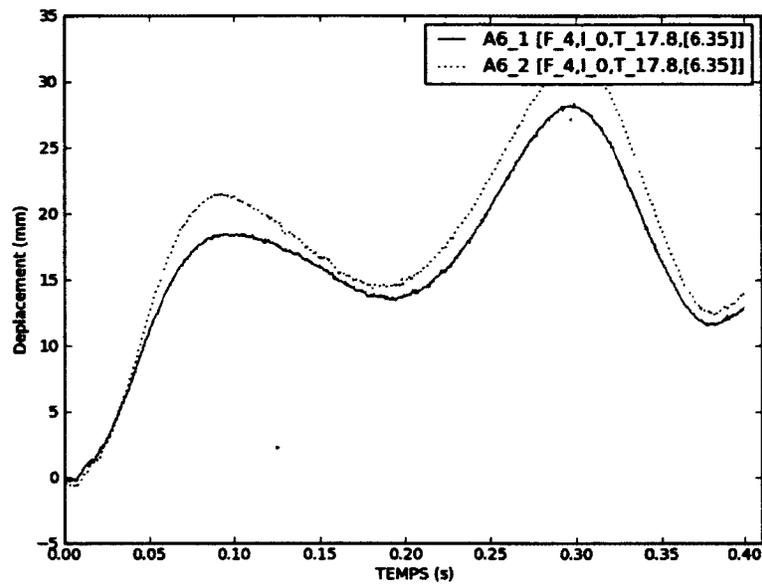


Figure B.24 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a6-1 et a6-2

### B.1.7 Cas A7

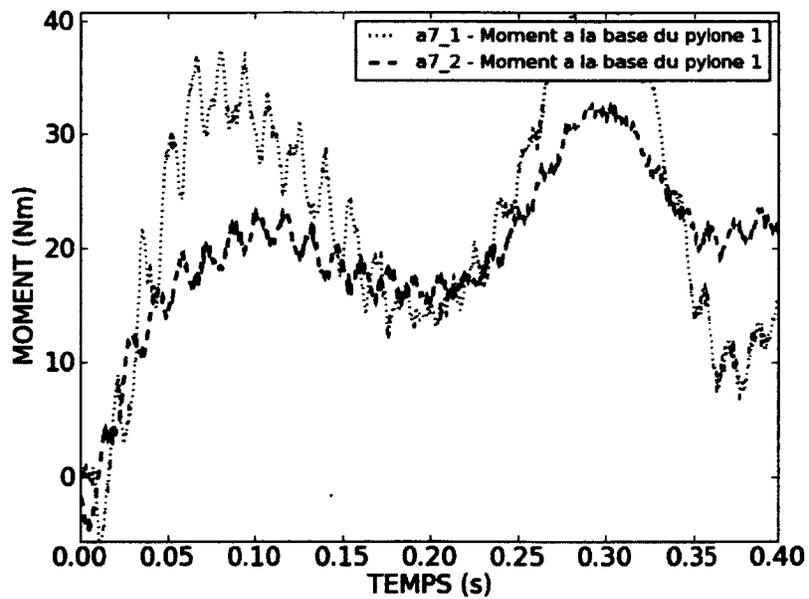


Figure B.25 Moment à la base du pylône 1 - Cas a7-1 et a7-2

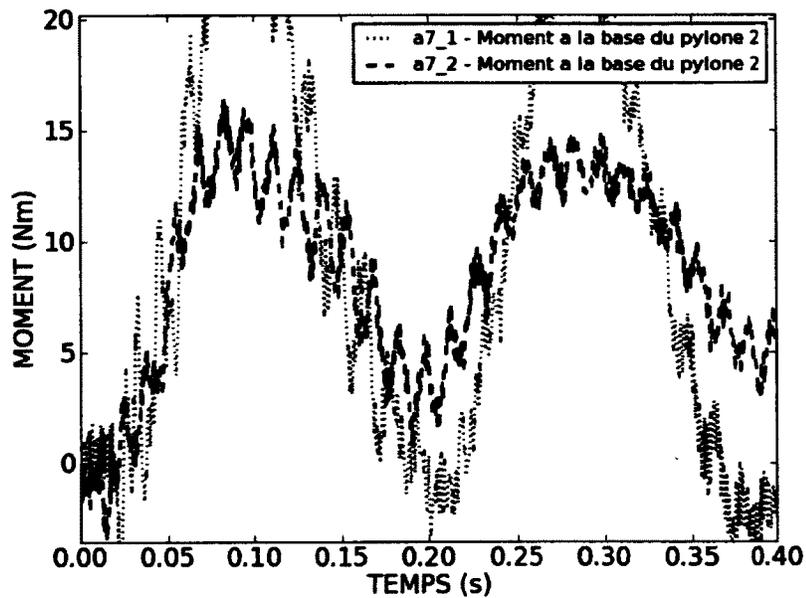


Figure B.26 Moment à la base du pylône 2 - Cas a7-1 et a7-2

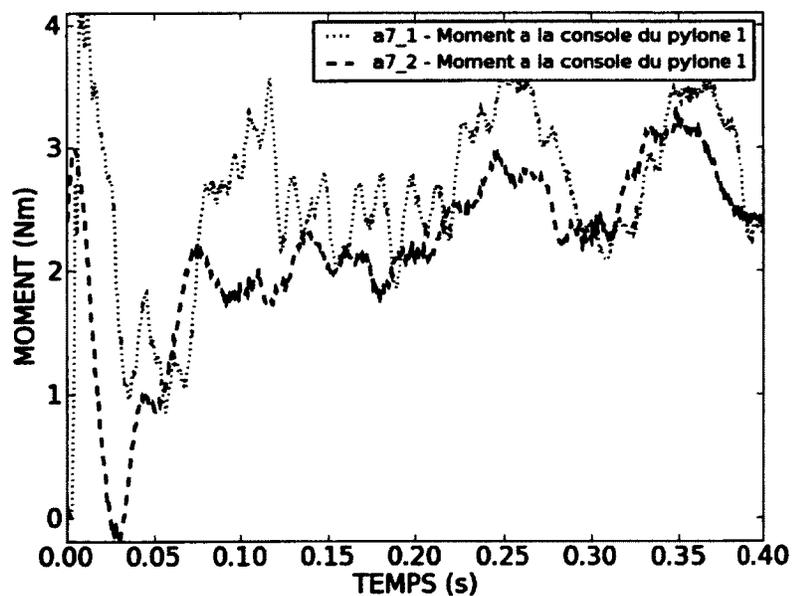


Figure B.27 Moment à la console du pylône 1 - Cas a7-1 et a7-2

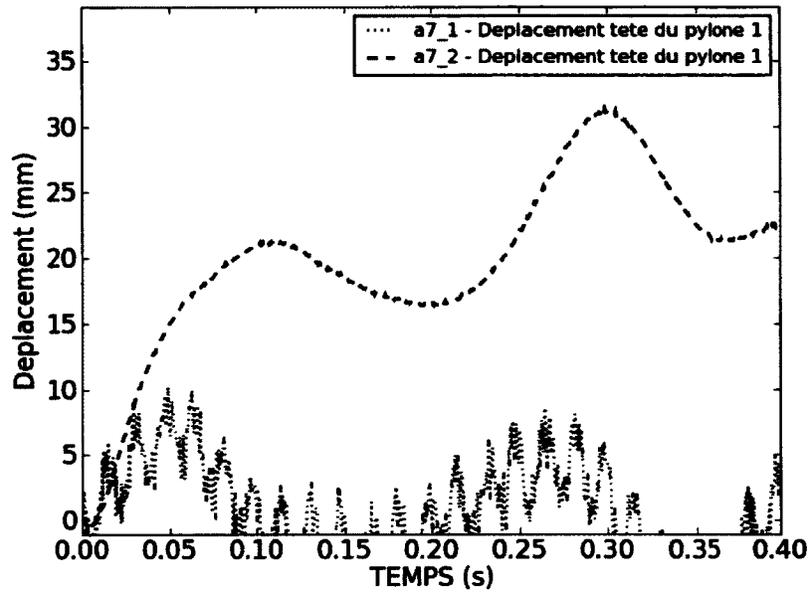


Figure B.28 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a7-1 et a7-2

**B.1.8 Cas A8**

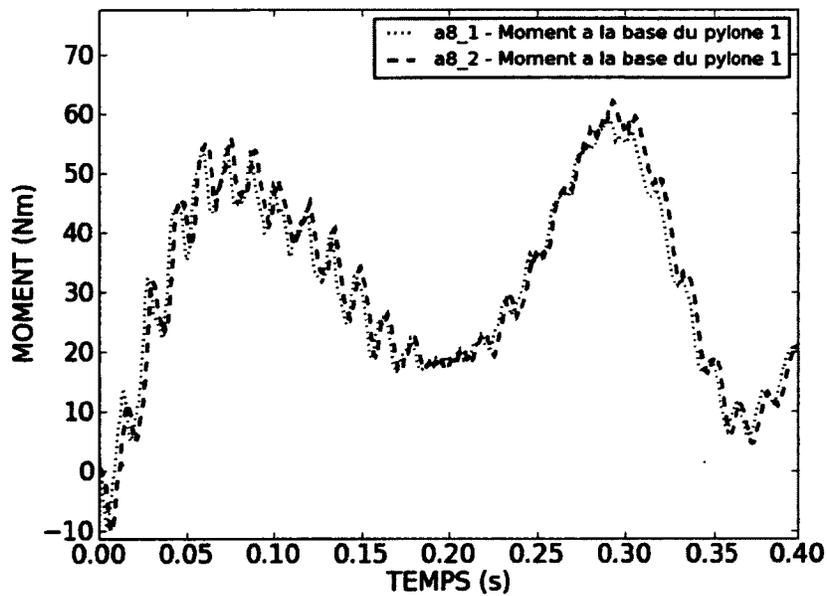


Figure B.29 Moment à la base du pylône 1 - Cas a8-1 et a8-2

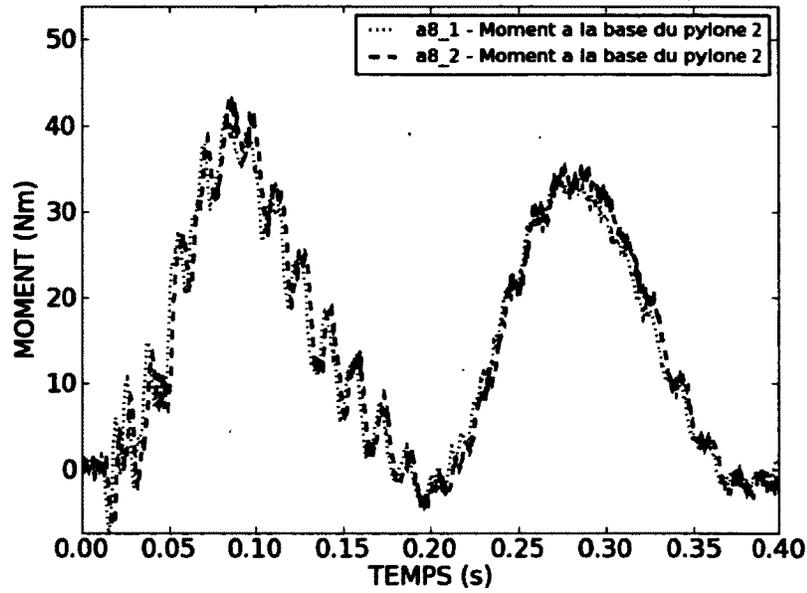


Figure B.30 Moment à la base du pylône 2 - Cas a8-1 et a8-2

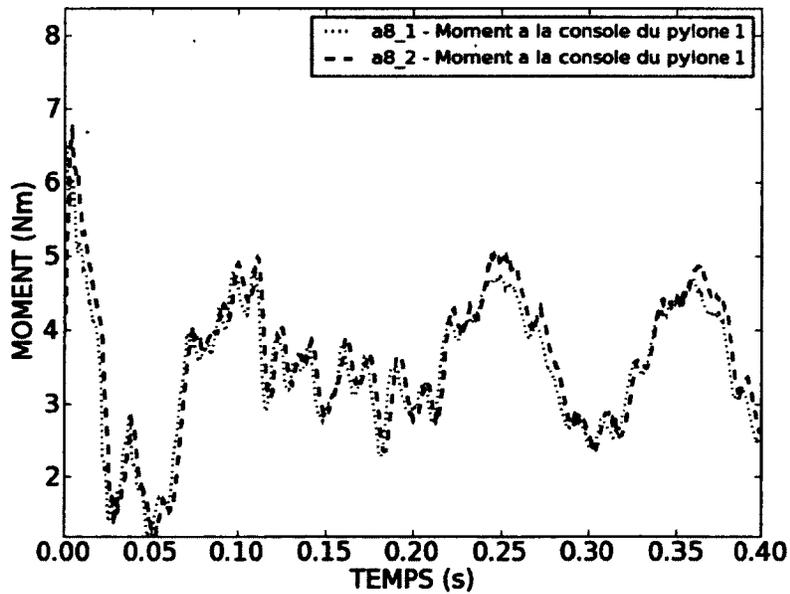


Figure B.31 Moment à la console du pylône 1 - Cas a8-1 et a8-2

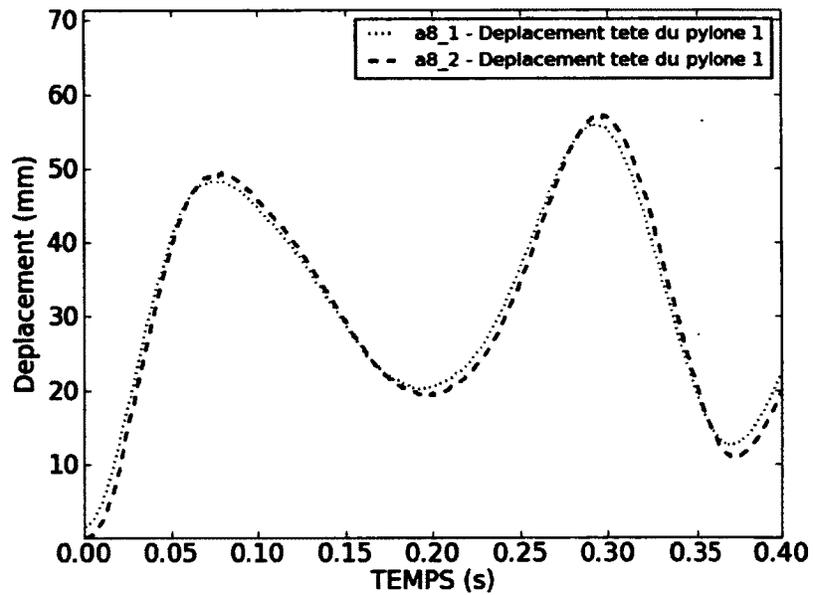


Figure B.32 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a17-1

### B.1.9 Cas A17

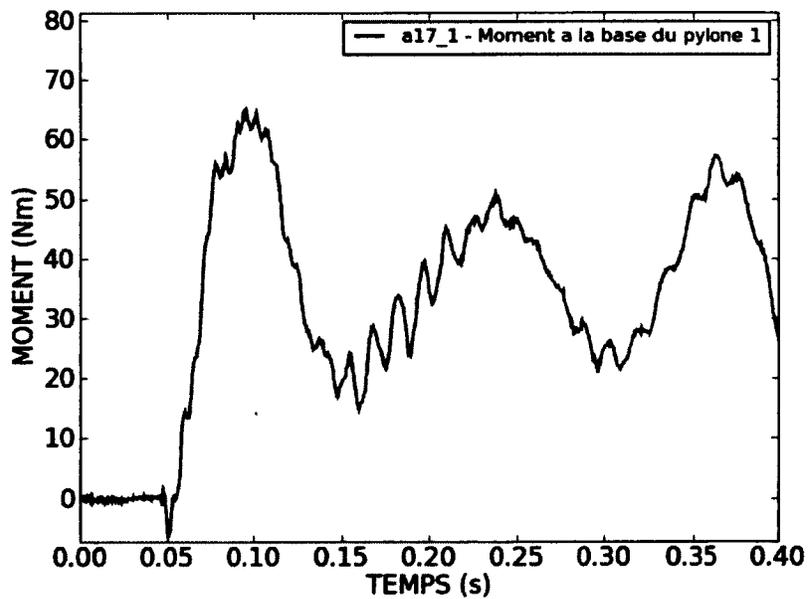


Figure B.33 Moment à la base du pylône 1 - Cas a17-1

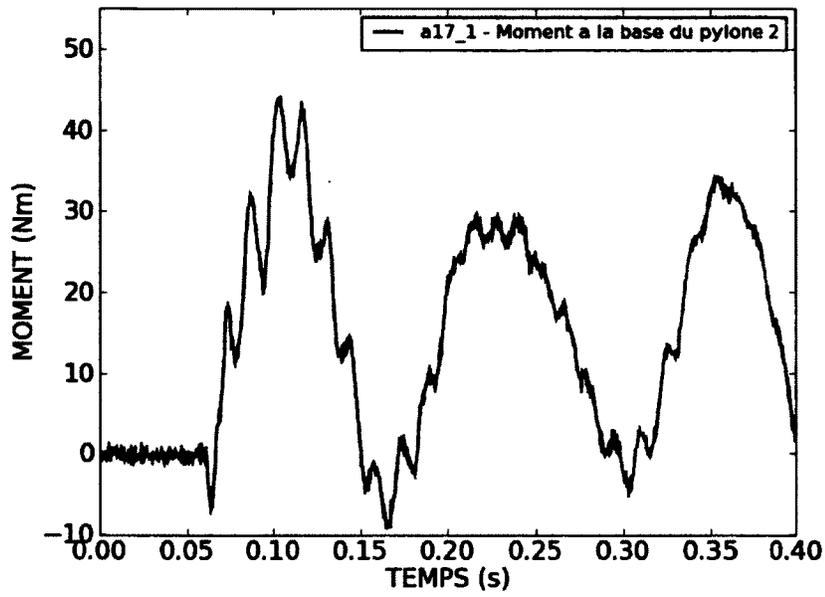


Figure B.34 Moment à la base du pylône 2 - Cas a17-1

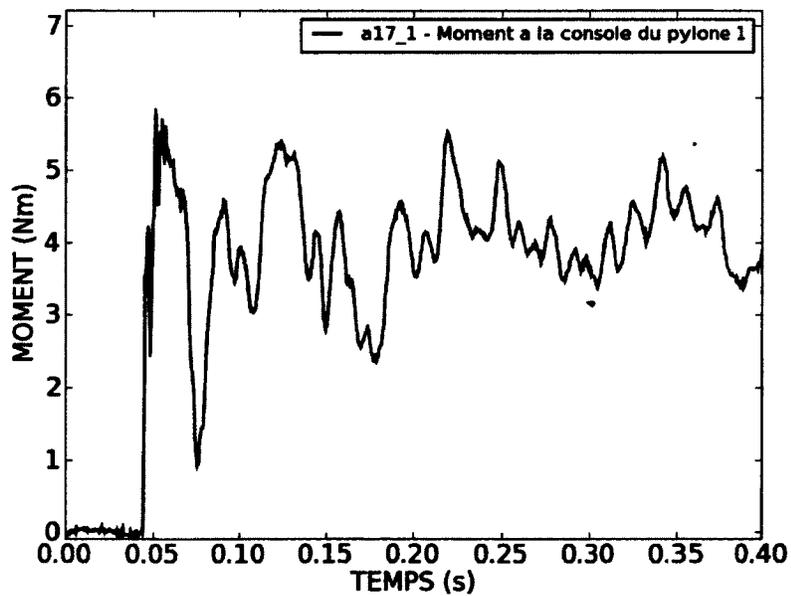


Figure B.35 Moment à la console du pylône 1 - Cas a17-1

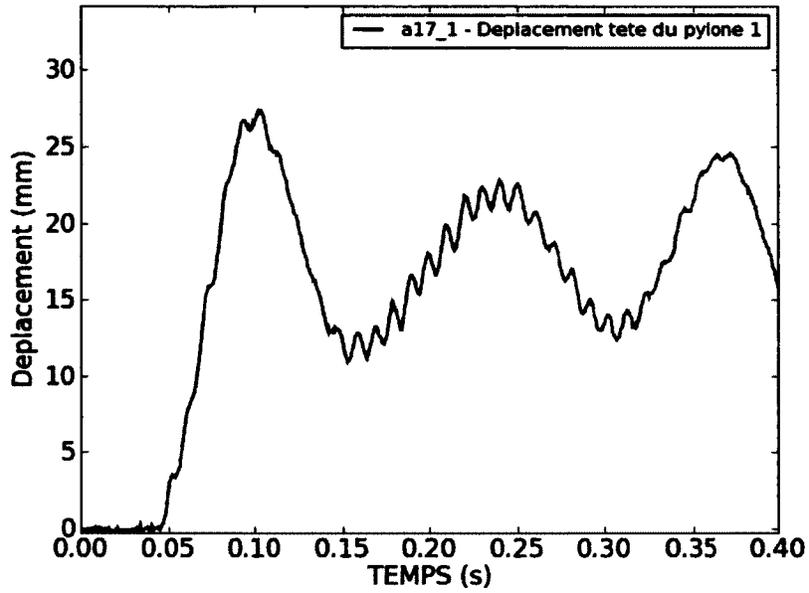


Figure B.36 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a17-1

**B.1.10 Cas A18**

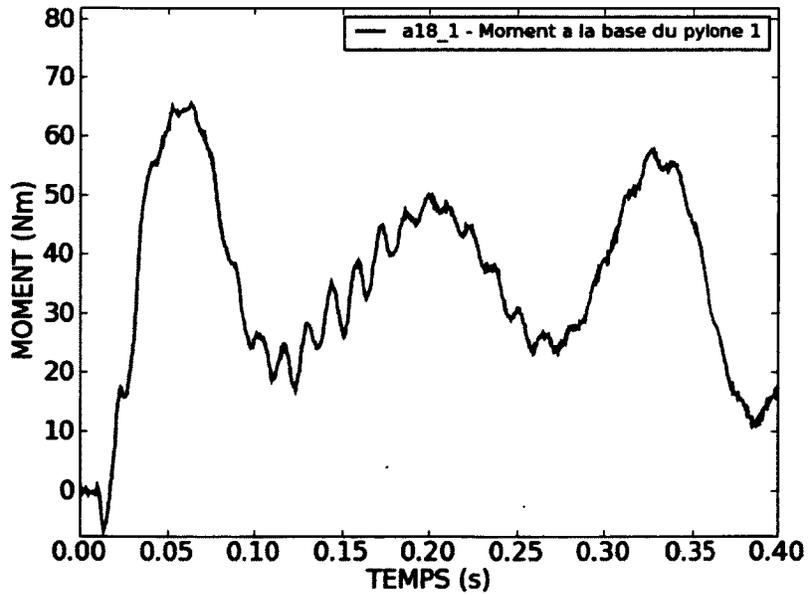


Figure B.37 Moment à la base du pylône 1 - Cas a18-1

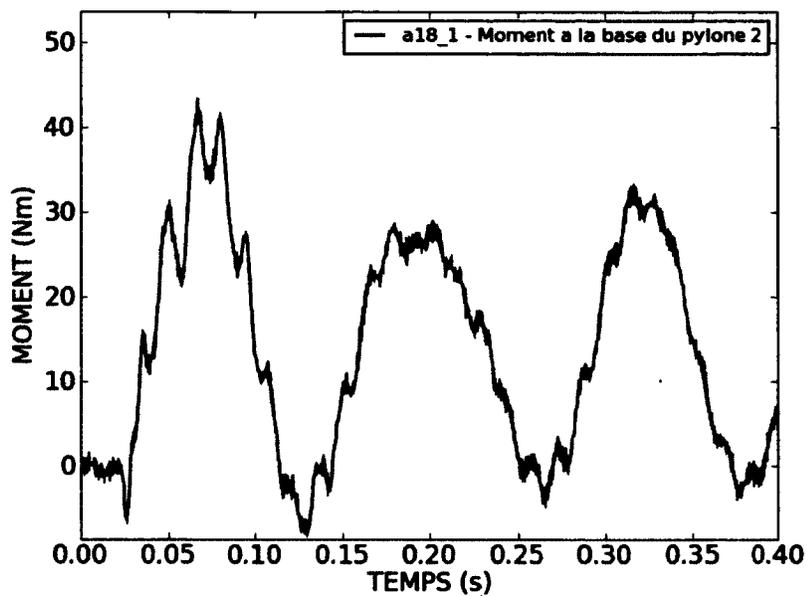


Figure B.38 Moment à la base du pylône 2 - Cas a18-1

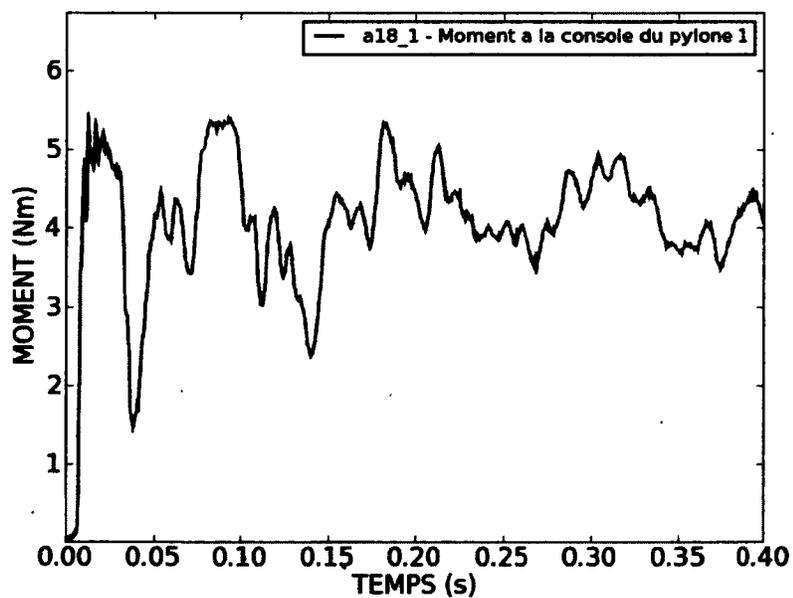


Figure B.39 Moment à la console du pylône 1 - Cas a18-1

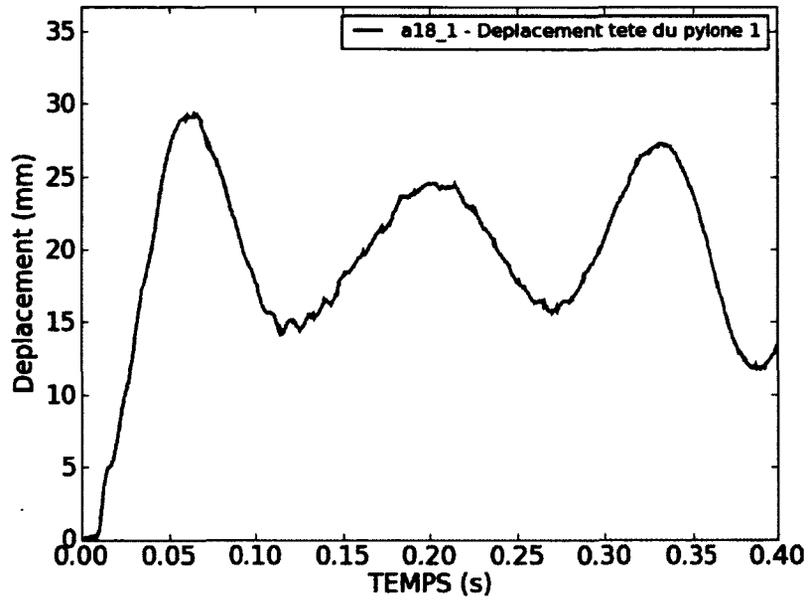


Figure B.40 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a18-1

**B.1.11 Cas A19**

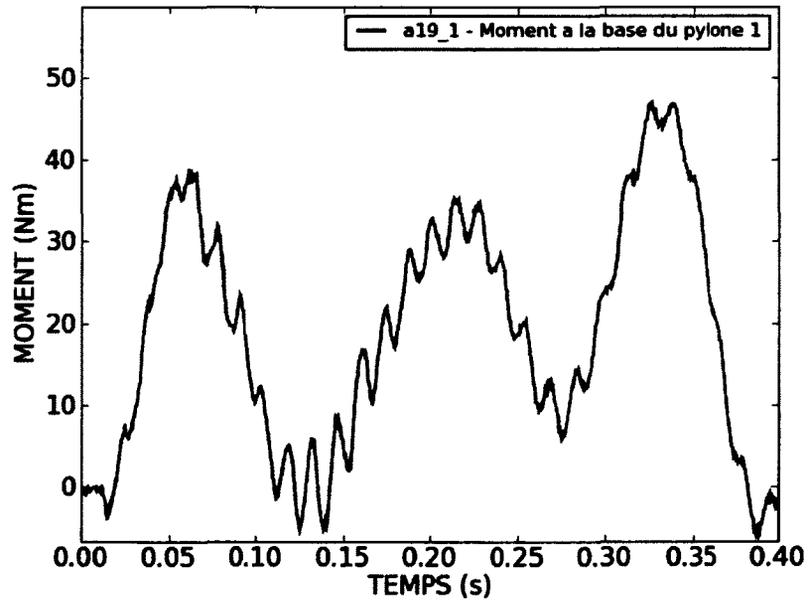


Figure B.41 Moment à la base du pylône 1 - Cas a19-1

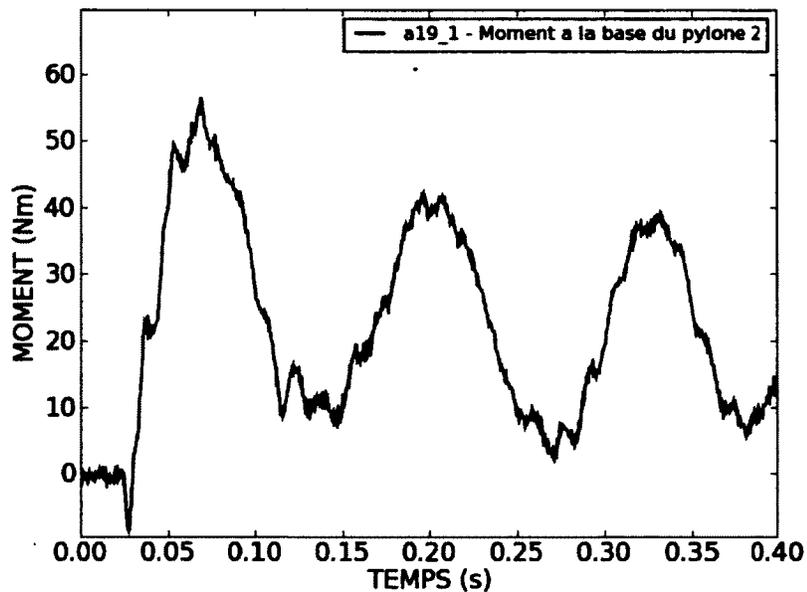


Figure B.42 Moment à la base du pylône 2 - Cas a19-1

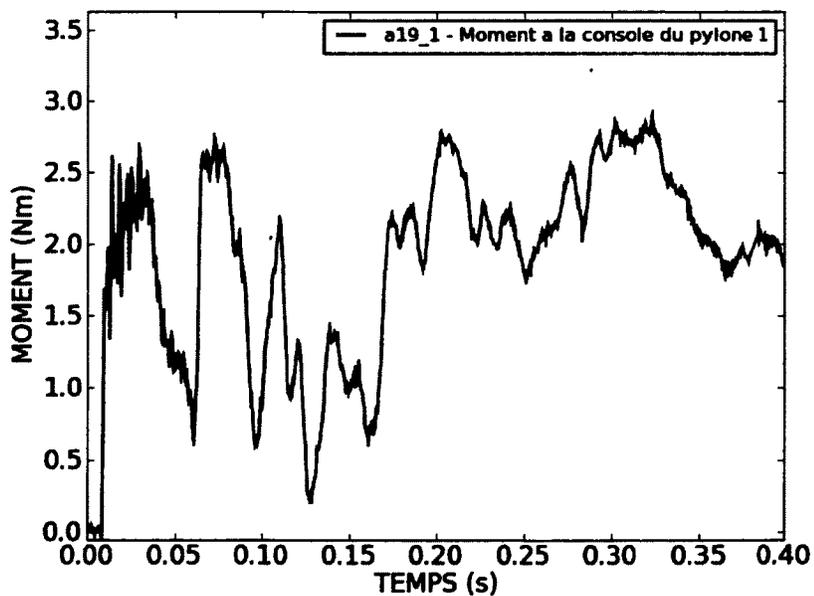


Figure B.43 Moment à la console du pylône 1 - Cas a19-1

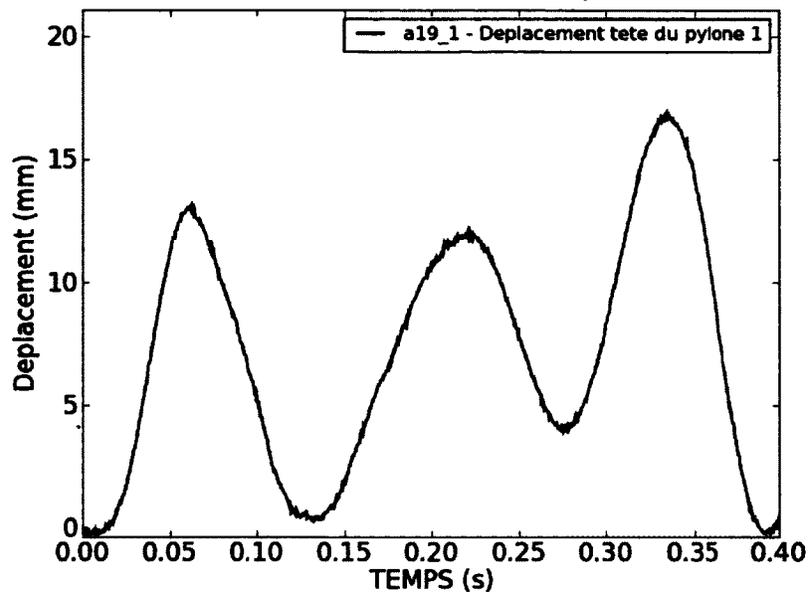


Figure B.44 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a19-1

### B.1.12 Cas A20

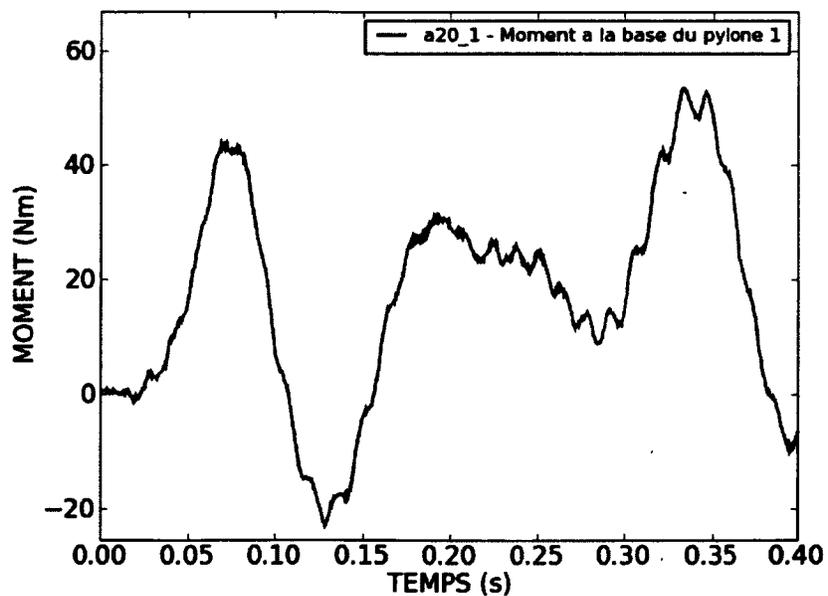


Figure B.45 Moment à la base du pylône 1 - Cas a20-1

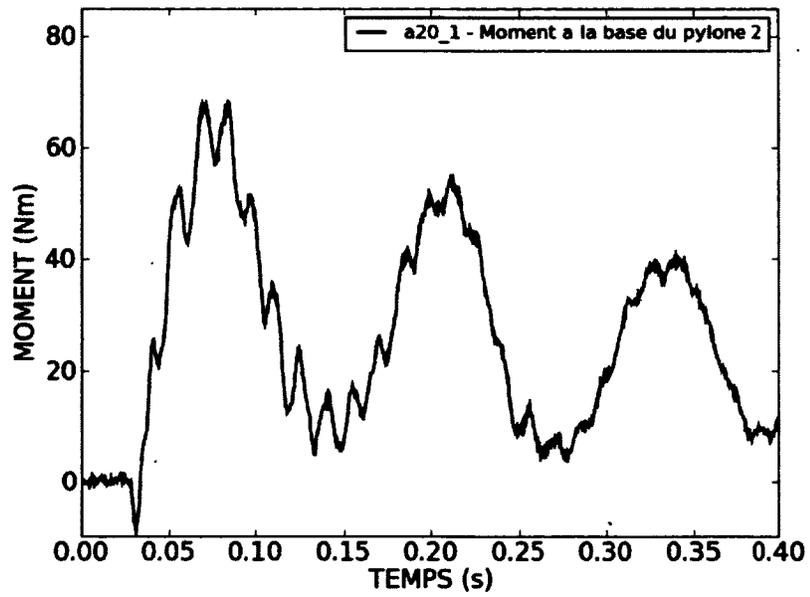


Figure B.46 Moment à la base du pylône 2 - Cas a20-1

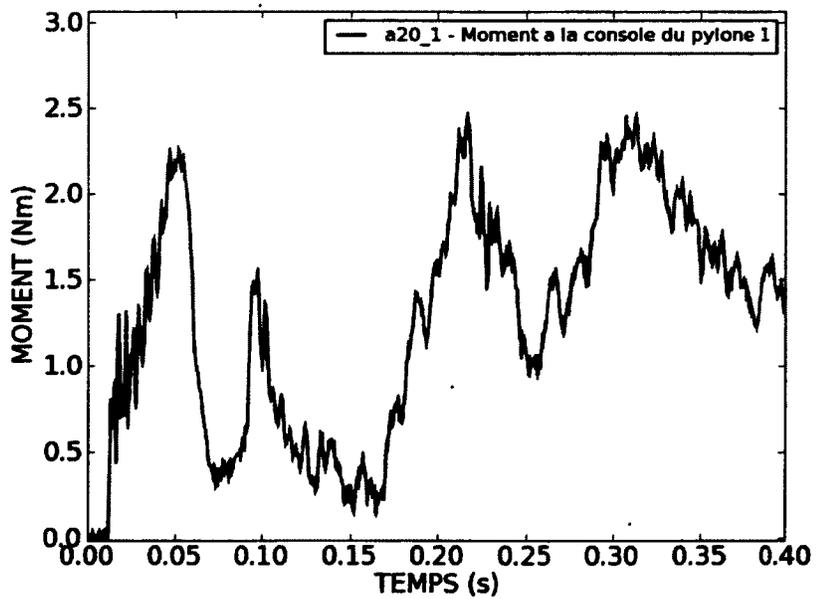


Figure B.47 Moment à la console du pylône 1 - Cas a20-1

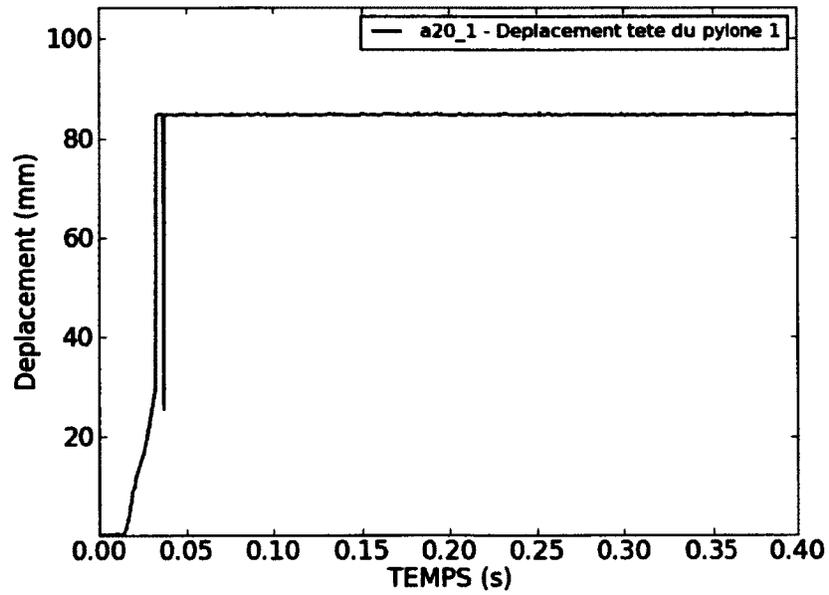


Figure B.48 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a20-1

**B.1.13 Cas A21**

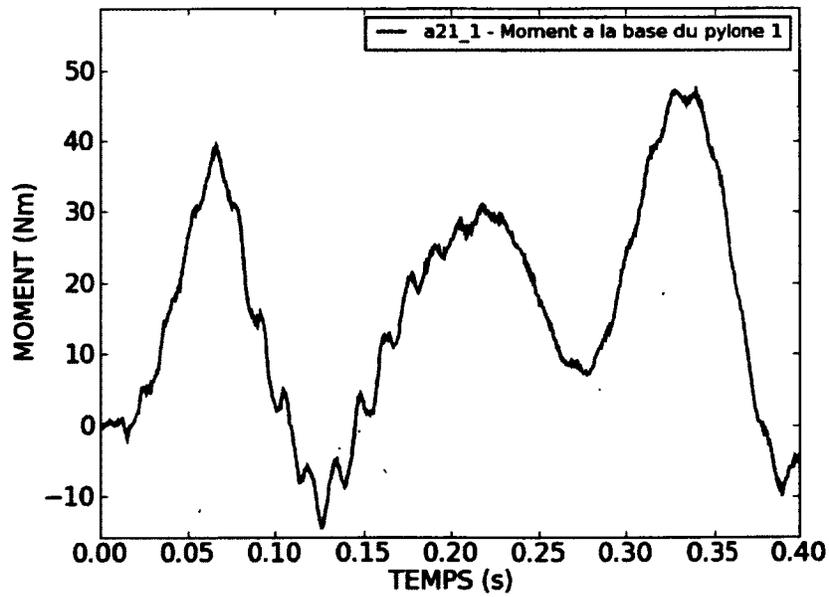


Figure B.49 Moment à la base du pylône 1 - Cas a21-1

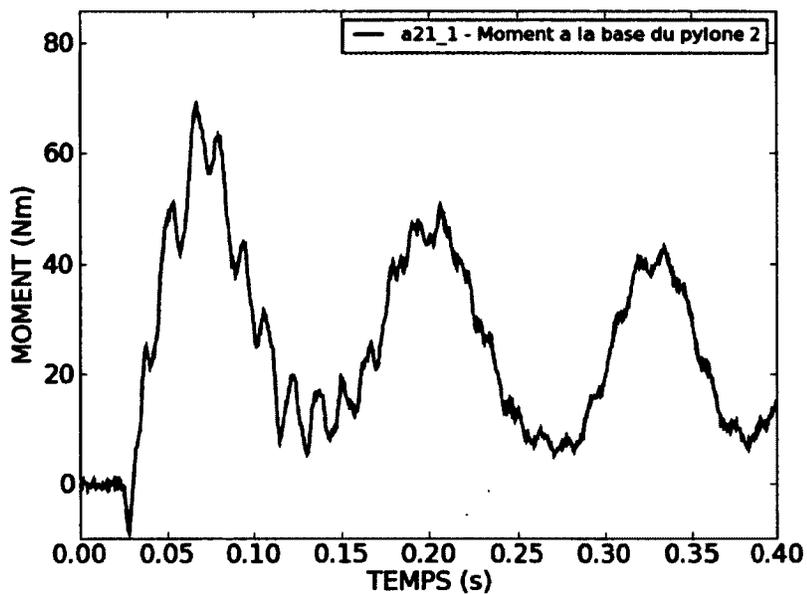


Figure B.50 Moment à la base du pylône 2 - Cas a21-1

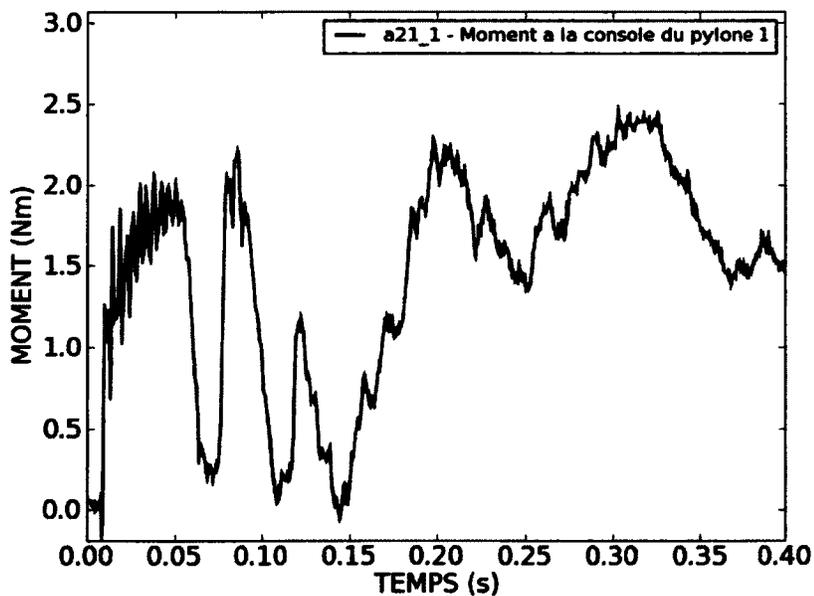


Figure B.51 Moment à la console du pylône 1 - Cas a21-1

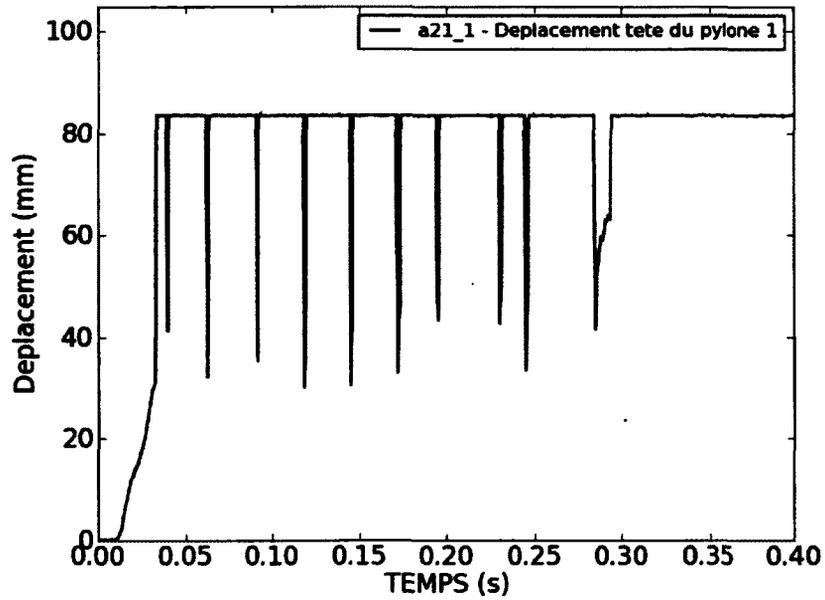


Figure B.52 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a21-1

**B.1.14 Cas A22**

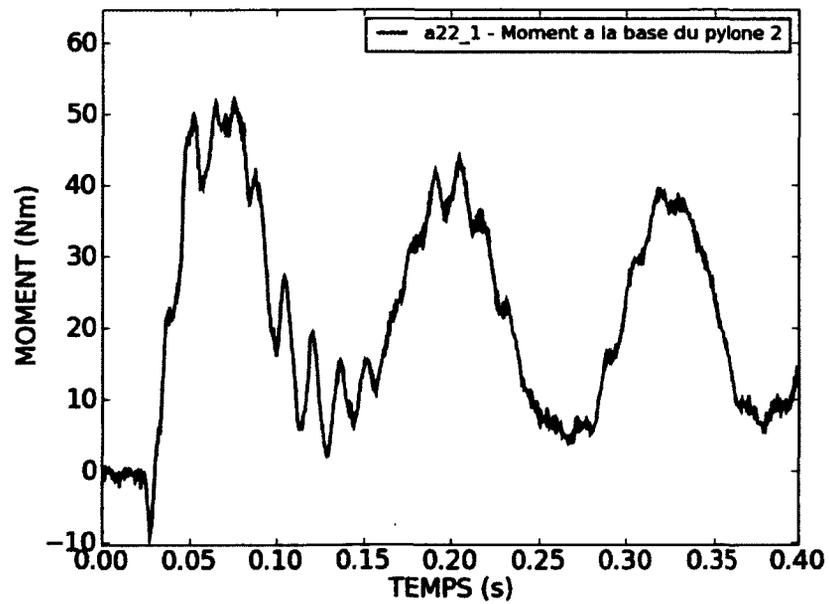


Figure B.54 Moment à la base du pylône 2 - Cas a22-1

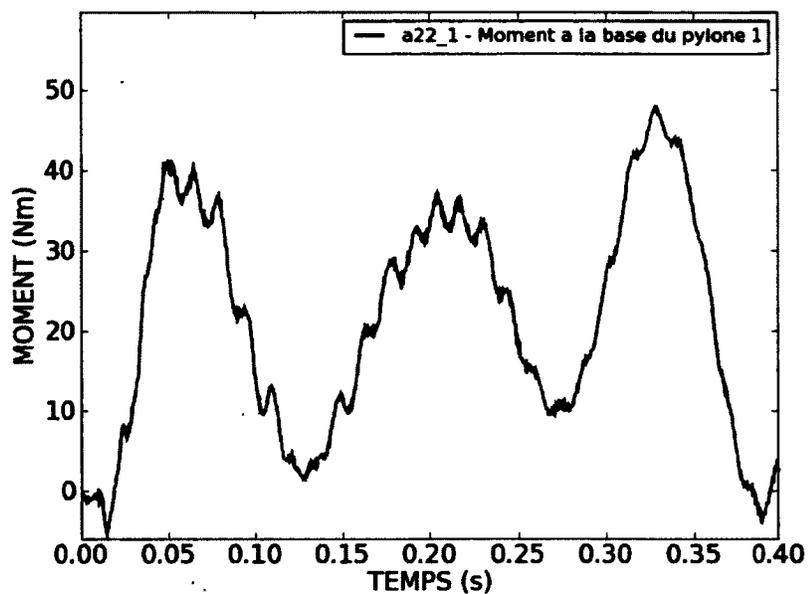


Figure B.53 Moment à la base du pylône 1 - Cas a22-1

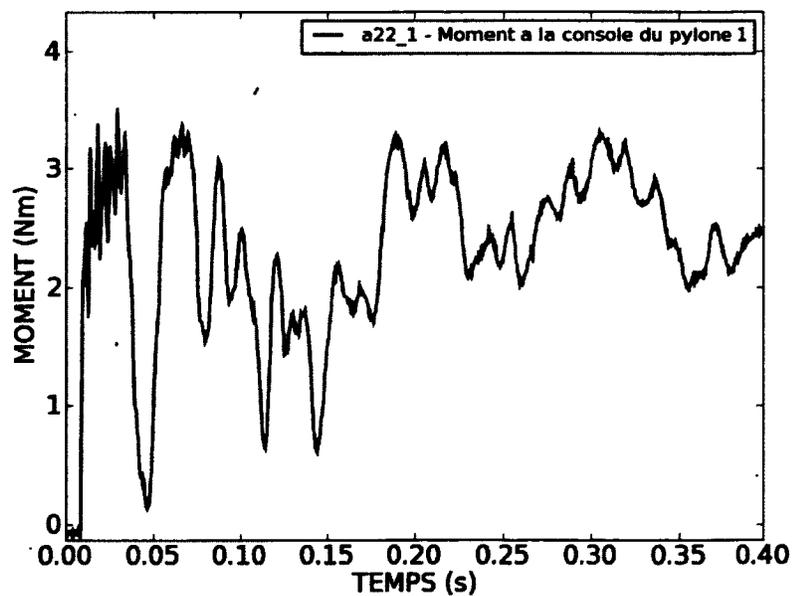


Figure B.55 Moment à la console du pylône 1 - Cas a22-1

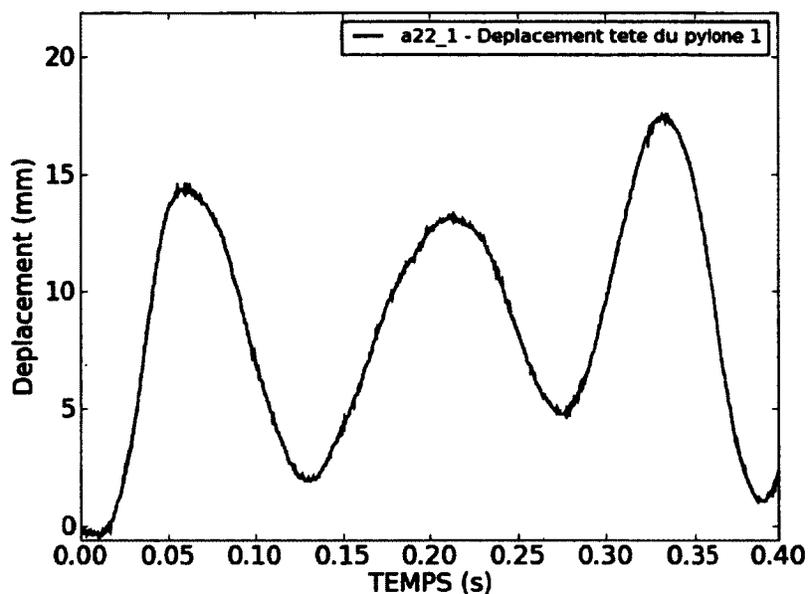


Figure B.56 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a22-1

**B.1.15 Cas A23**

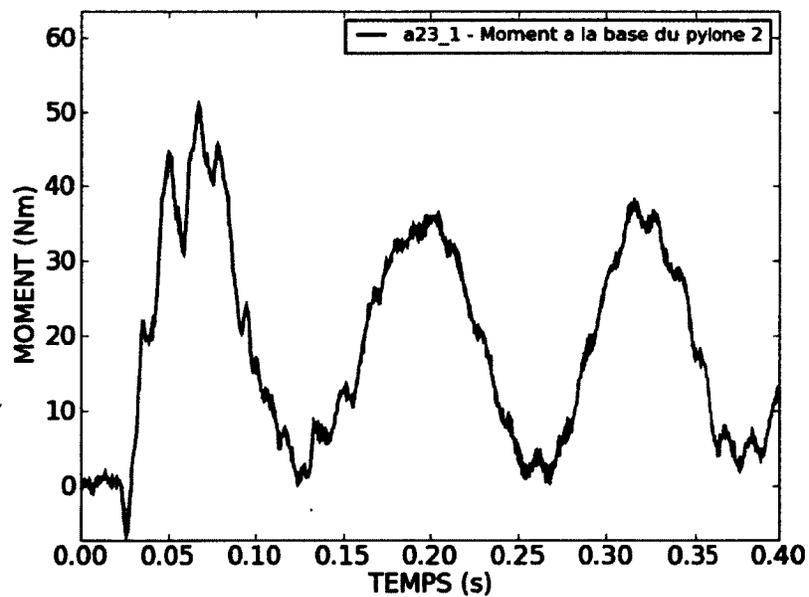


Figure B.58 Moment à la base du pylône 2 - Cas a23-1

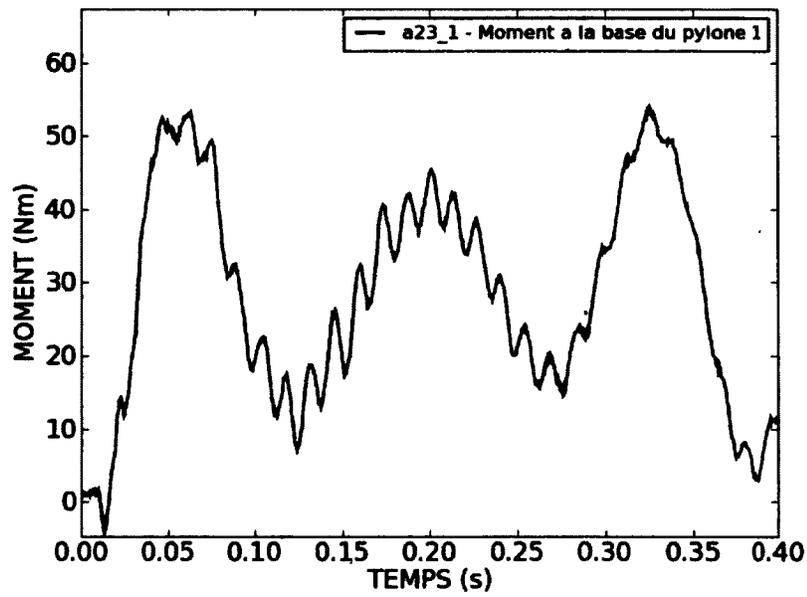


Figure B.57 Moment à la base du pylône 1 - Cas a23-1

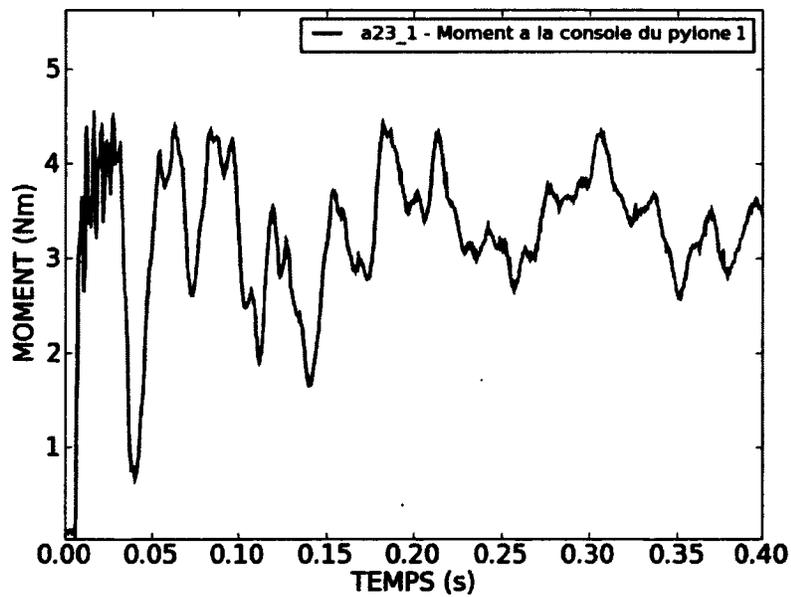


Figure B.59 Moment à la console du pylône 1 - Cas a23-1

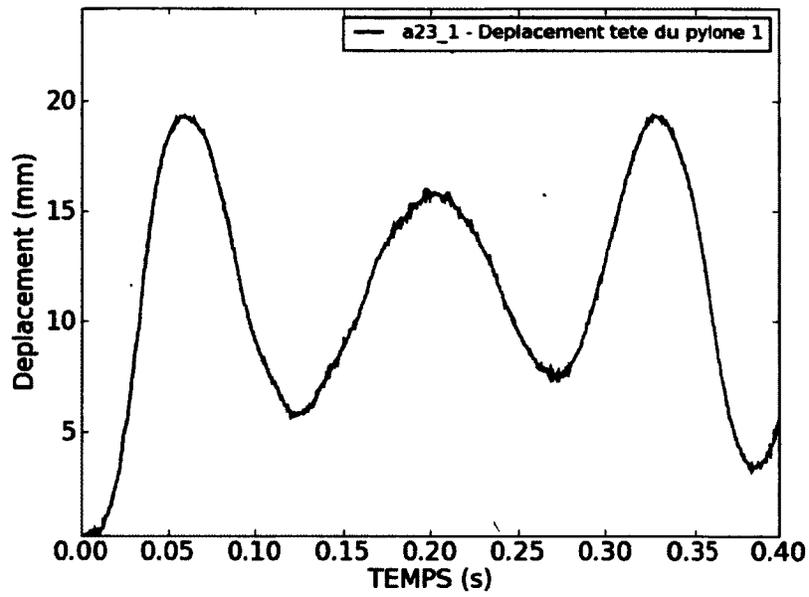


Figure B.60 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a23-1

**B.1.16 Cas A24**

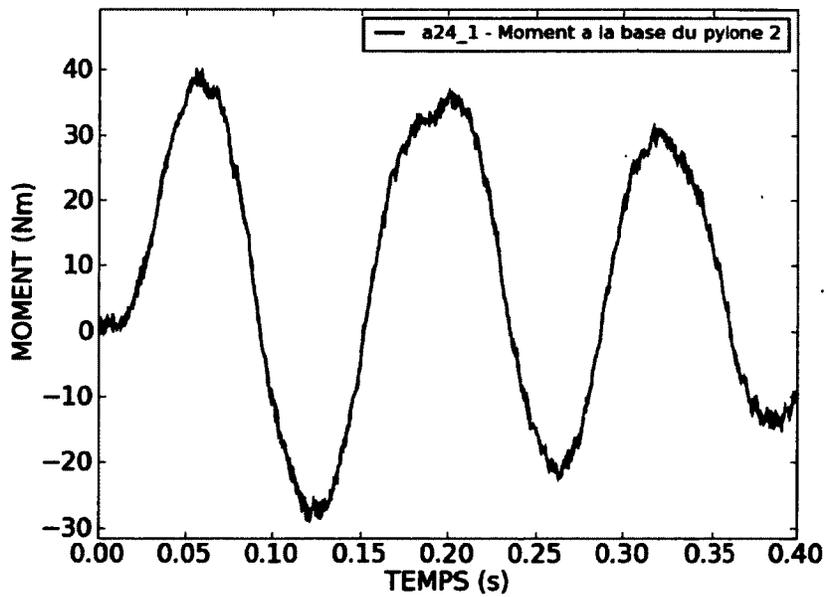


Figure B.62 Moment à la base du pylône 2 - Cas a24-1

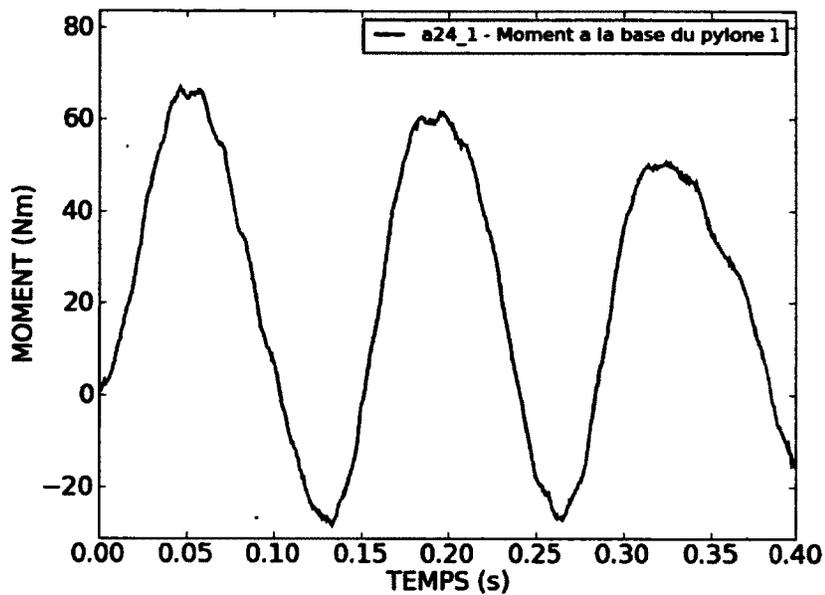


Figure B.61 Moment à la base du pylône 1 - Cas a24-1

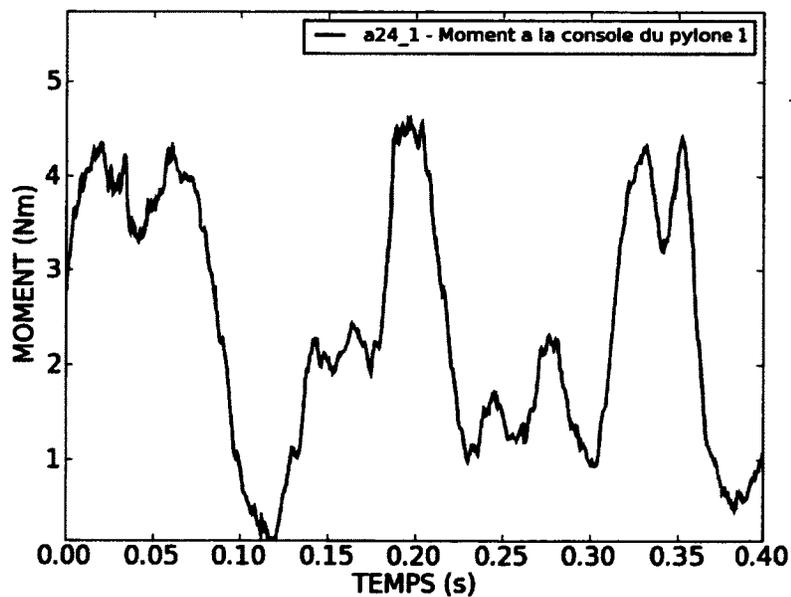


Figure B.63 Moment à la console du pylône 1 - Cas a24-1

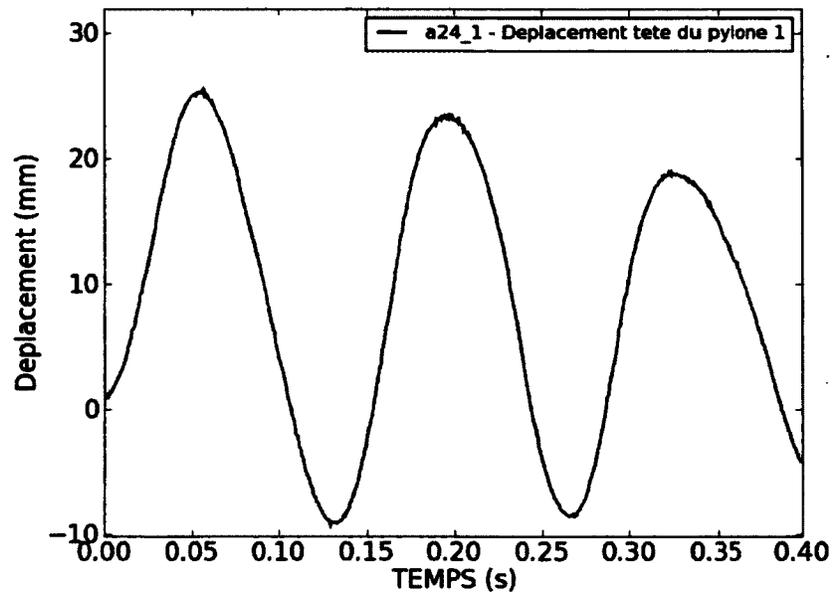


Figure B.64 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a24-1

### B.1.17 Cas A25

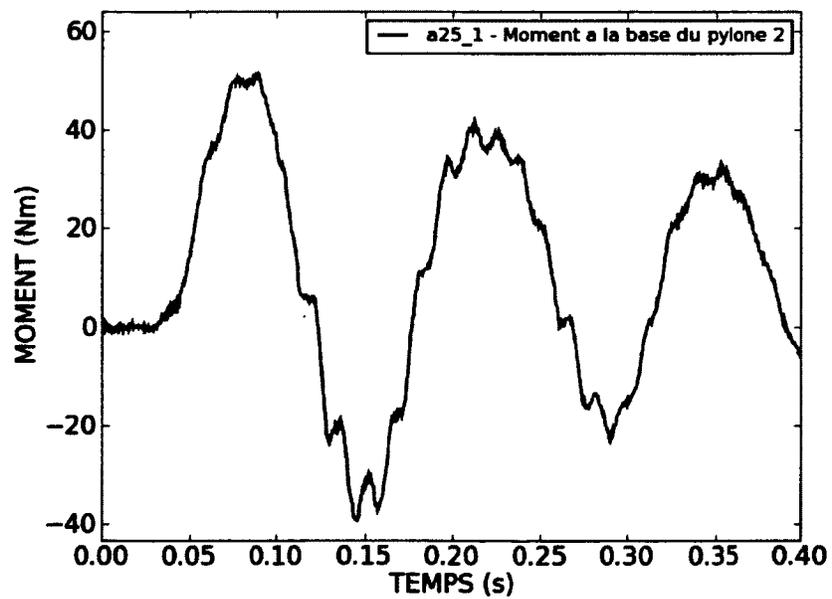


Figure B.66 Moment à la base du pylône 2 - Cas a25-1

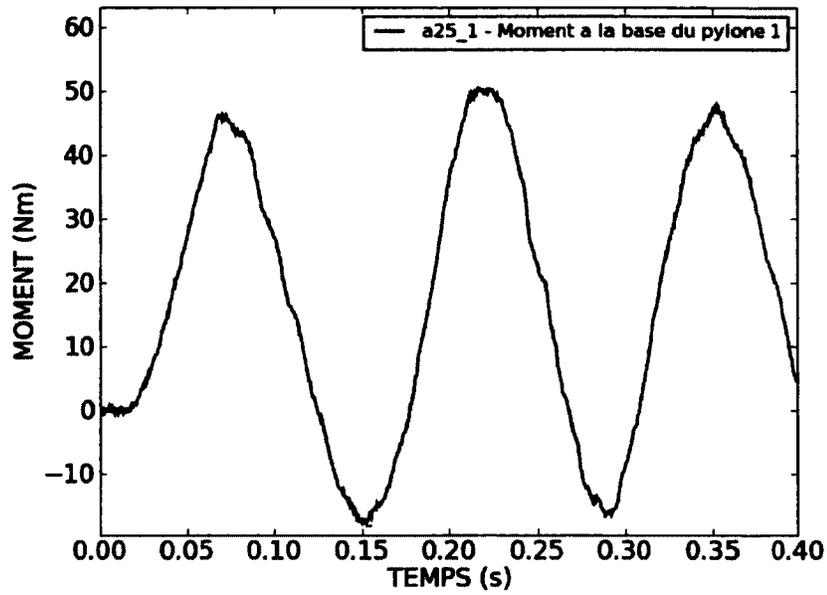


Figure B.65 Moment à la base du pylône 1 - Cas a25-1

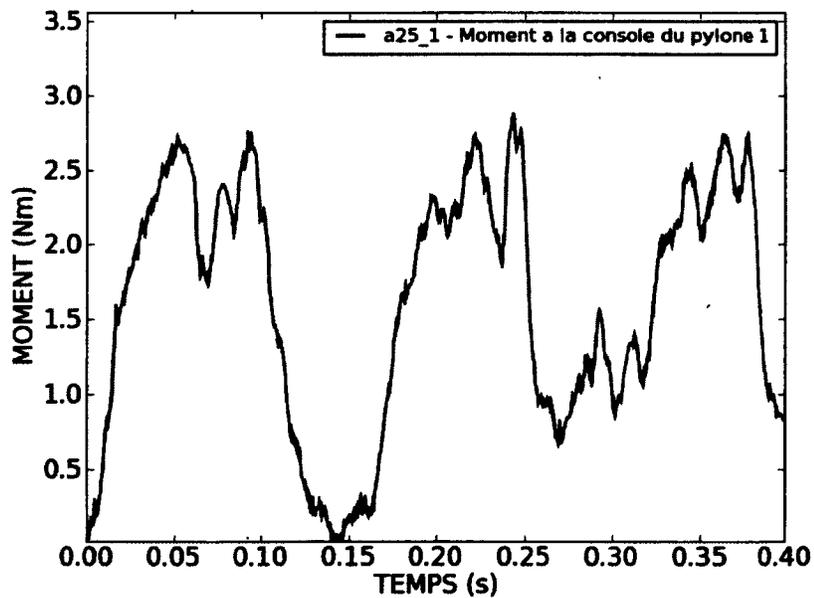


Figure B.67 Moment à la console du pylône 1 - Cas a25-1

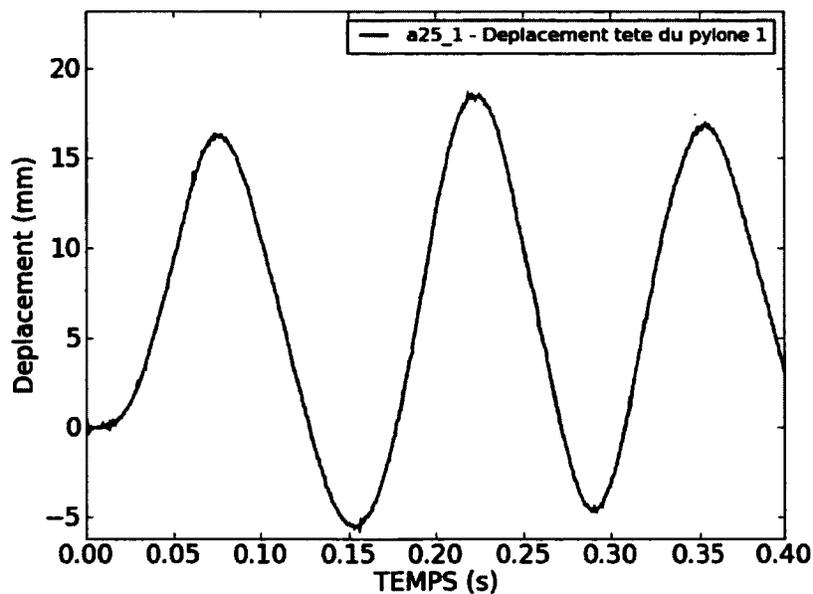


Figure B.68 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a25-1

### B.1.18 Cas A26

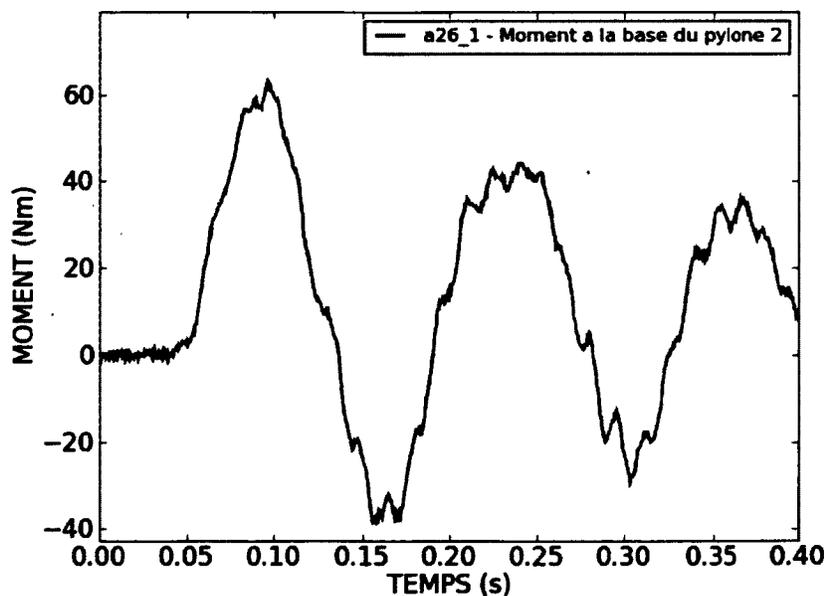


Figure B.70 Moment à la base du pylône 2 - Cas a26-1

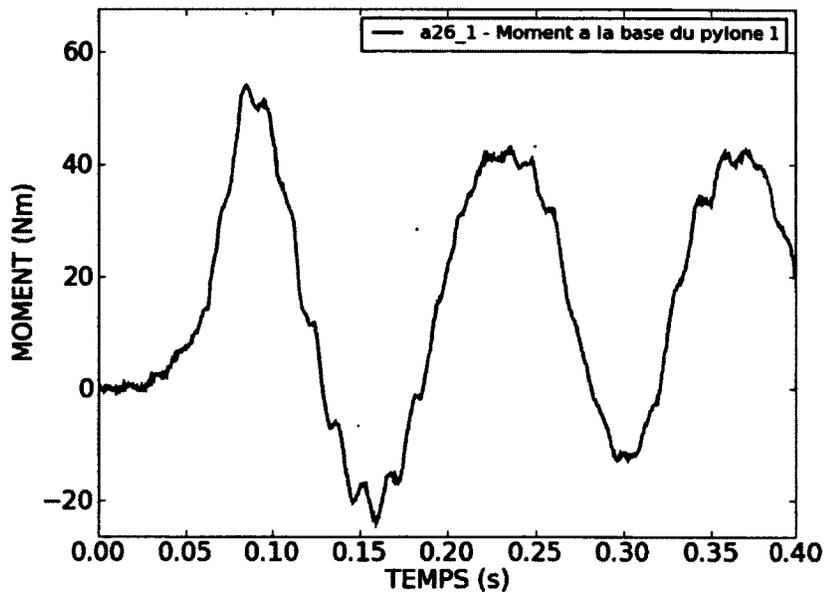


Figure B.69 Moment à la base du pylône 1 - Cas a26-1

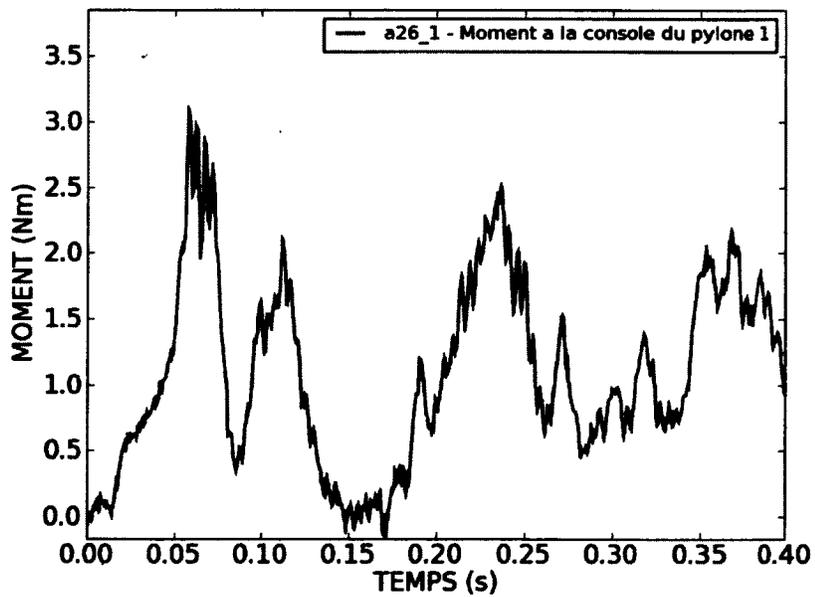


Figure B.71 Moment à la console du pylône 1 - Cas a26-1

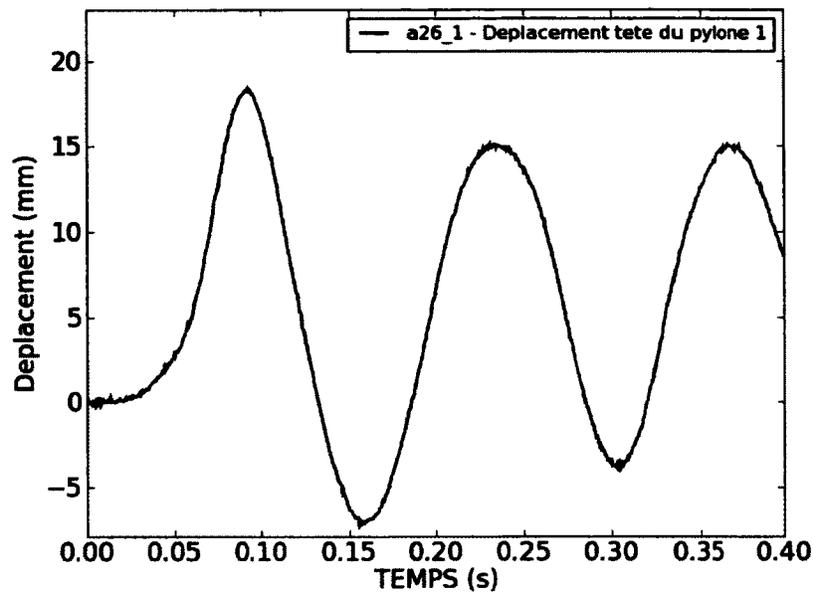


Figure B.72 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a26-1

### B.1.19 Cas A27

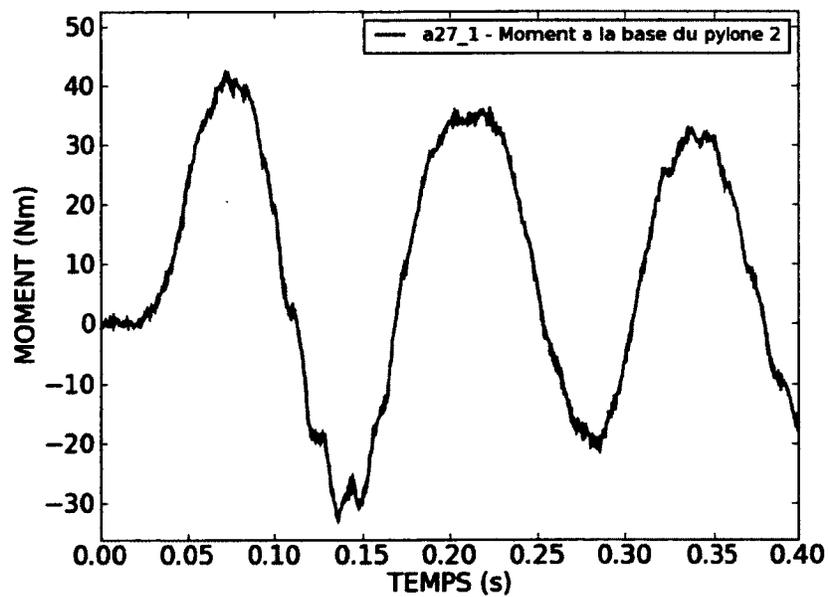


Figure B.74 Moment à la base du pylône 2 - Cas a27-1

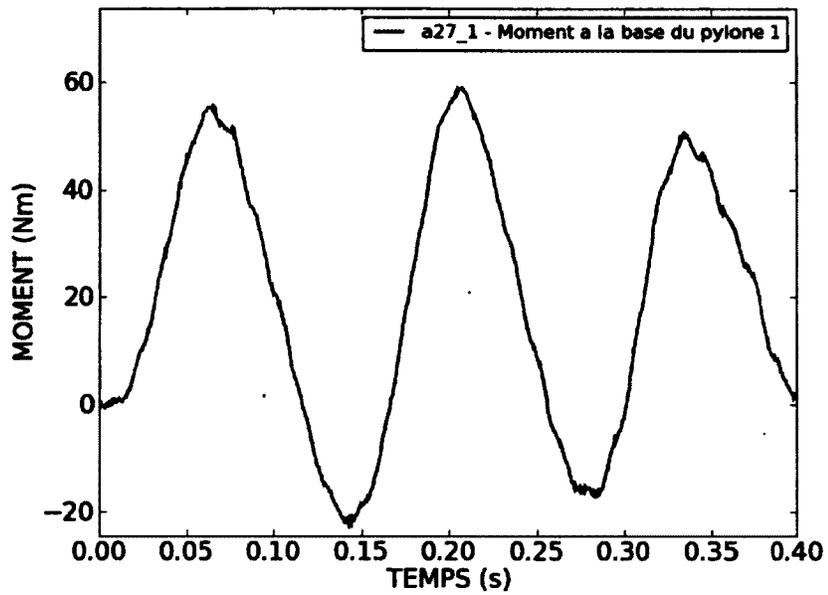


Figure B.73 Moment à la base du pylône 1 - Cas a27-1

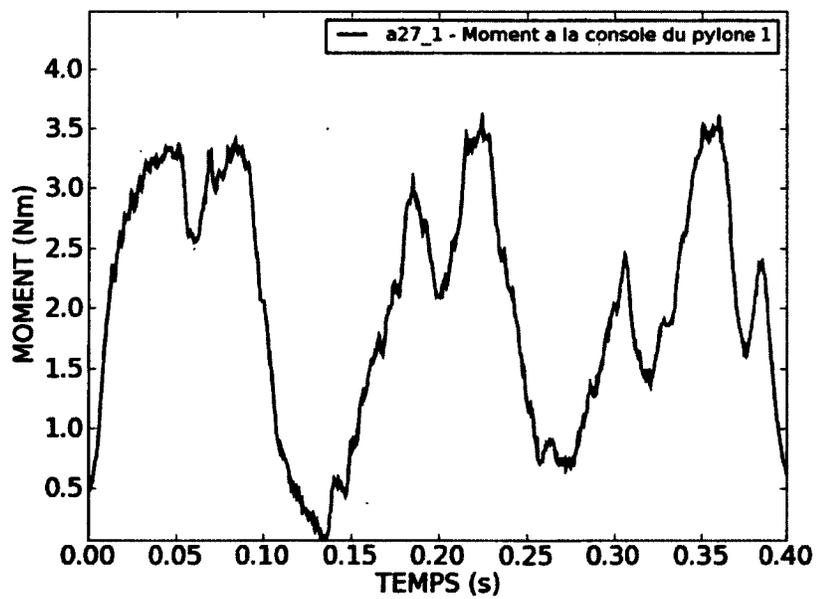


Figure B.75 Moment à la console du pylône 1 - Cas a27-1

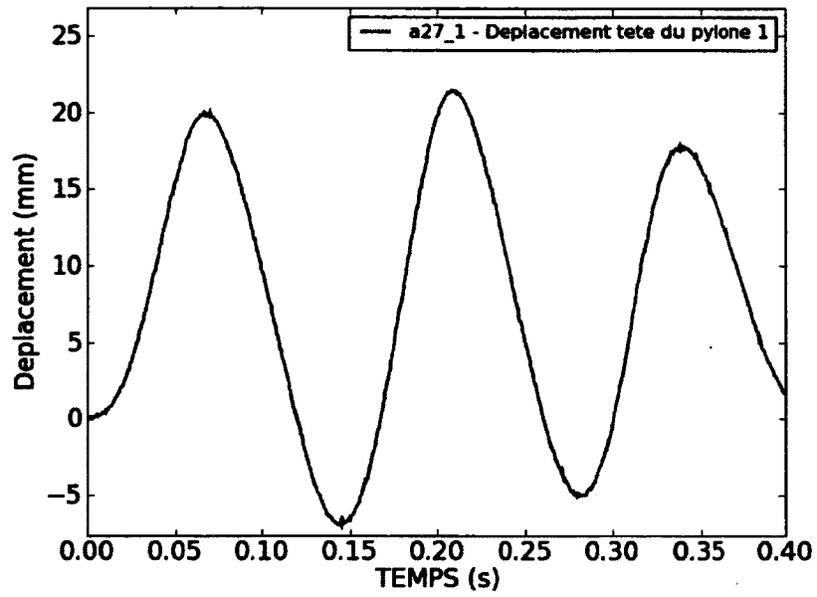


Figure B.76 Déplacement de la tête du pylône 1 - Cas a27-1



# LISTE DES RÉFÉRENCES

- ABBAS, M. (2011). *Formulation discrète du contact-frottement* (Rapport technique R5.03.50). EDFR&D.
- Chappé et al. (1948). The protection of pylons against accidental longitudinal stresses phenomena arising from conductor breakage. *CIGRE*, volume 213.
- CLOUGH, R. et PENZIEN, J. (2003). *Dynamics of structures*, 3<sup>e</sup> édition. computer and Structures, Inc.
- DE SOZA, T. (2009). *Poutres multi-fibres en grands déplacements* (Rapport technique R3.08.09). EDFR&D.
- DigitizeIt (2011). *DigitizeIt 1.5*. <http://www.digitizeit.de> (page consultée le 2011).
- EDF, R, e. D. (2011). *Site officiel logiciel Code-Aster*. <http://www.code-aster.org> (page consultée le 2011).
- ENR (1928). Transmission tower with rotating crossarm developed. *Engineering news record*, volume 100(21).
- FLEJOU, J.-L. (2010). *Modélisation des câbles* (Rapport technique R3.08.02). EDF R&D.
- FLEJOU, J.-L. (2011). *Modélisation statique et dynamique des poutres en grandes rotations* (Rapport technique R5.03.40). EDFR&D.
- Fleming (1933). Structural tower. *U.S. Patent*, volume S.O., p. S.O.
- Goia (1993). Overhead electric line pole protection against machanical overloads. *6th international workshop ont the atmospheric icing of structure*, volume S.O., p. S.O.
- Iordanescu (2000). Fusibles mécaniques d'ancrage ireq-slacan pour lignes de distribution. essais de validation du prototype (ireq-slacan). *Institut de recherche d'Hydro-Québec*, volume S.O., p. S.O.
- JONES, N. (1989). *Structural Impact*, 1<sup>re</sup> édition. Cambridge university press.
- KEMPNER, L. J. (1997). *Longitudinal impact loading on electrical transmission line towers - A scale model study*. Thèse de doctorat, Portland State University.
- LAPOINTE, M. (2003). *Dynamic Analysis of a power line subjected to longitudinal loads*. Thèse de doctorat, McGill University.
- McCLURE, G. et TINAWI, R. (1989). Comportement dynamique des lignes aériennes de transport d'électricité dû aux bris de câbles. *Canadian journal of civil engineering*, volume 16, p. 335-353.
- Miller (1932). Cable support. *U.S. Patent*, volume S.O., p. S.O.
- MOULIN, S. (2010). *Élément de poutre multifibre (droite)* (Rapport technique R3.08.08). EDFR&D.

- MOZER, j. D. (1978). *Longitudinal Unbalanced loads on transmission line structure* (Rapport technique EL-643). Electric Power Research Institute.
- PEABODY, A. (2004). *Applying shock damping to the problem of transmission line cascade*. Thèse de doctorat, McGill University.
- Python, Software, F. (2011). *Python Programming Language ? Official Website*. <http://www.python.org> (page consultée le 2011).