

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de Génie Civil

# ÉTENDUE DES RUINES EN CASCADE DES STRUCTURES DES LIGNES DE TRANSPORT D'ÉNERGIE EN FONCTION DES CHARGES DE CONCEPTION

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : Génie Civil

Oussama Lamine NAOUALI

Jury : Frédéric Légeron  
Charles-Philippe Lamarche (rapporteur)  
Louis-Philippe Bérubé



# RÉSUMÉ

Les lignes de transport d'énergie électrique haute tension sont conçues pour résister aux charges climatiques, principalement les charges de vent, de glace, de service et de construction. En plus des charges usuelles, les lignes peuvent être soumises à d'autres charges comme celles résultant de la chute d'un pylône, d'une erreur humaine ou du bris d'une composante. Ces derniers ne sont pas toujours pris en compte directement par les normes en vigueur lors du dimensionnement. Ces charges sont de type dynamique et causent éventuellement des dégâts importants qui endommagent un pylône voire même toute une partie de ligne qui nécessite des coûts et délais élevés pour la réparation et la remise en service de la ligne. L'objectif de ce projet de recherche consiste donc à étudier la contribution de ces événements dynamiques susceptibles d'avoir lieu sur une ligne afin de prédire le nombre de pylônes pouvant être affectés par un tel cas de chargement. En particulier, l'étude contribuera à relier le nombre de pylônes affectés à la capacité des pylônes pour permettre aux concepteurs de prendre des décisions rationnelles sur les charges longitudinales à considérer en fonction de ce qui est jugé acceptable comme étendue d'une cascade en cas de bris de conducteur.

La méthodologie de cette étude se divise en deux grandes étapes. La première consiste à valider la méthode de modélisation proposée pour étudier en dynamique le phénomène de bris de conducteur. D'abord, il s'agit d'adopter un essai de bris de conducteur disponible dans la littérature établi sur un canton à échelle réduite comme modèle de référence et valider la méthode proposée de modélisation numérique avec les résultats expérimentaux obtenus pour cet essai. Une seconde validation d'une poutre en porte-à-faux avec une charge statique appliquée à l'extrémité libre a été aussi réalisée afin de valider le comportement non linéaire du matériau à l'aide des éléments poutres de Timoshenko en multifibre avec grands déplacements et grandes rotations. Cette seconde validation servira comme référence pour modéliser les éléments mats et consoles des pylônes. La deuxième étape consiste à étudier numériquement l'étendue d'une cascade sur un canton de ligne composé de pylônes tubulaires lors d'un bris de tous les conducteurs. Une étude paramétrique a été réalisée pour comprendre l'effet des paramètres suivants sur l'étendue de la cascade : la capacité des pylônes, la charge axiale dans les conducteurs, la longueur de la portée, les hypothèses pour la loi de comportement du matériau et la longueur des chaînes d'isolateurs.

Les résultats obtenus ont montré que l'étendue de la cascade dépend fortement de la tension mécanique des câbles dans un premier lieu et légèrement de la longueur de la portée et des chaînes d'isolateurs en second lieu. Cependant la loi de comportement n'a pas présentée beaucoup de différence vis-à-vis le nombre de pylônes affectés. Cette étude montre qu'il est possible pour un concepteur de lignes de transport de concevoir les pylônes de la ligne avec une capacité de pylônes inférieure à ceux correspondants aux charges longitudinales maximales anticipées en acceptant un certain nombre de pylônes pouvant être endommagés.

**Mots-clés :** Ligne de transport d'énergie électrique, pylônes tubulaires, bris de conducteurs, éléments finis, confinement des ruines, dynamique des structures.



# REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de recherche Monsieur Frédéric LÉGERON, professeur à l'université de Sherbrooke, qui a accepté de suivre mon travail, afin que je puisse mener ce projet à terme.

Je tiens également à remercier vivement Sébastien LANGLOIS qui s'est présenté comme un guide, me donnant les directives et les conseils pertinents.

J'adresse mes plus tendres pensées à mes parents en Tunisie qui m'ont encouragé de près ou de loin tout au long de cette aventure, et à ma nouvelle famille au Canada et tout spécialement à ma chère femme Sarah et mon bébé Youssef pour la patience et le soutien dont ils ont fait preuve durant la durée de ces années de maîtrise.

Merci aux amis et collègues qui m'ont au cours de ces années de maîtrise accompagné et partagé leurs savoirs : Ahmed BOUBAKER, Taleb SABBEK et Simon PRUD'HOMME.



# TABLES DES MATIÈRES

<i>RÉSUMÉ</i> .....	<i>i</i>
<i>REMERCIEMENTS</i> .....	<i>iii</i>
<i>LSTES DES FIGURES</i> .....	<i>ix</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	<i>xv</i>
<i>LISTE DES ACRONYMES</i> .....	<i>xvii</i>
CHAPITRE I. INTRODUCTION .....	1
1. Historique des lignes .....	1
2. Mise en contexte .....	1
3. Description sommaire d'une ligne aérienne .....	2
4. Cascade des lignes de transport définition et historique .....	5
CHAPITRE II. état des connaissances sur le confinement des ruines.....	7
1. Études expérimentales.....	7
1.1. Essais à grandeur nature .....	7
1.2. Essais à échelle réduite .....	9
1.2.1. Travaux de Mozer [1978] .....	9
1.2.2. Travaux de Kempner [1997] .....	13
1.2.3. Travaux de Bérubé [2011] .....	15
2. Méthodes analytique et numérique .....	17
2.1. Notion de facteur d'impact .....	17
2.2. Analyse statique .....	19
2.2.1. Procédure de l'analyse statique .....	19
2.2.2. Rigidité des éléments .....	20
2.3. Analyse dynamique .....	22
2.4. Solution de l'équation différentielle du mouvement .....	23
3. Approche numérique .....	23
3.1. Algorithme non linéaire dynamique sous Code_Aster .....	23
3.2. Problèmes numériques associés à la modélisation mathématique .....	24
3.2.1. Méthode d'intégration de Newmark- $\beta$ : .....	24
3.2.2. Méthode HHT- $\alpha$ .....	26
3.2.3. Méthode d'intégration de Wilson- $\theta$ .....	27
4. Confinement des ruines .....	28
4.1. Insertion de pylône compétent.....	28
4.2. Console fusible .....	28
4.3. Console avec fusible ductile .....	29

4.4.	Pince de glissement.....	29
4.5.	Mécanisme de libération de la chaîne d'isolateur .....	30
CHAPITRE III. Définition du projet de recherche.....		33
CHAPITRE IV. Validation préliminaire .....		35
1.	Validation de l'essai E20 de Mozer .....	35
1.1.	Caractéristiques de la modélisation et du maillage .....	36
1.2.	Résultats de la modélisation et interprétations.....	39
CHAPITRE V. Modélisation d'un canton de ligne .....		42
1.	Description du modèle étudié.....	42
2.	Description de la modélisation et du maillage.....	44
3.	Étapes de la modélisation .....	47
4.	Étude de sensibilité .....	49
4.1.	Incrément de temps .....	49
4.2.	Dicrétisation des éléments.....	49
4.3.	Choix de la durée de l'analyse.....	51
5.	Paramètres d'étude.....	53
5.1.	Lois de comportement .....	53
5.2.	Capacité des pylônes.....	54
5.3.	Tension dans les câbles .....	57
5.4.	Longueur de portée.....	58
5.5.	Longueur des chaînes d'isolateurs .....	59
6.	Description des résultats.....	59
6.1.	Observations générales.....	60
7.	Résultats des calculs et interprétations .....	60
7.1.	Résultats du cas de référence .....	60
7.1.1.	Autre hypothèse étudiée pour le cas de référence.....	68
7.2.	Influence de la longueur des portées.....	70
7.2.1.	Résultats .....	70
7.2.2.	Observations .....	70
7.3.	Influence de la loi de comportement.....	76
7.3.1.	Résultats .....	76
7.3.2.	Observations .....	80
7.4.	Influence de la longueur des chaînes d'isolateurs .....	82
7.4.1.	Résultats .....	83
7.4.2.	Observations .....	92
CHAPITRE VI. Conclusion .....		93
Annexe A .....		95



Annexe B.....	97
Annexe C.....	109
Annexe D .....	121
LISTE DES RÉFÉRENCES.....	133



# LISTES DES FIGURES

<i>Figure 1- Catastrophe de verglas Montréal, janvier 1998 .....</i>	<i>2</i>
<i>Figure 2 - Exemples de pylônes: (a) pylône autoporteur en treillis; (b) pylône haubané en V; (c) pylône à chaînette; (d) pylône tubulaire; (e) pylône en béton; (f) pylône en bois .....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 3 - Schéma des composants structuraux d'une ligne aérienne [McClure et Tinawi, 1988] ..</i>	<i>4</i>
<i>Figure 4 - Composants d'un pylône [Source: Hydro-Québec].....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 5-Essais à échelle réelle [Haro et al, 1956].....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 6-Réponse typique d'une section de ligne soumise à un bris de conducteur [Haro et al, 1956].....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 7-Bris de conducteur [Peyrot et al, 1978].....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 8-Modèle d'étude de [Mozer, 1978].....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 9-Détail structure à échelle réduite [Mozer, 1978] .....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 10-Influence du ratio porté longueur des chaînes d'isolateurs sur la réponse dynamique [Mozer, 1978] .....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 11-Influence de la position de bris sur le moment maximum à la base du pylône adjacent au point de bris [Mozer, 1978] .....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 12-Modèle d'étude de la réponse au bris d'un conducteur [Kempner, 1997].....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 13-Base pylône d'alignement [Bérubé, 2011] .....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 14-Fusible ductile [Bérubé, 2011].....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 15 -Influence du facteur d'impact dans l'étude dynamique [Peyrot et al, 1978].....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 16-Facteur d'impact selon Mozer [Mozer, 1978].....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 17-Configuration d'un câble à égale élévation [Campbell, 1970].....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 18- Forces dans l'isolateur [Siddiqui and Flemming, 1983] .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 19-Schéma de stabilité Newmark-<math>\beta</math> [M. Geradin and D. Rixen] .....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 20-Console fusible [Chappé et al, 1948].....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 21-Console avec fusible ductile [Bérubé, 2011] .....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 22-Pince fusible [Miller, 1932].....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 23-Mécanisme de libération de la chaîne d'isolateur [Fleming, 1933].....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 24-Mécanisme de libération de la chaîne d'isolateur [Milow, 1964].....</i>	<i>31</i>

<i>Figure 25-Mécanisme d'absorption d'énergie [Ibanez et Merz, 1988]</i> .....	32
<i>Figure 26-Banc d'essais [Mozer, 1978]</i> .....	35
<i>Figure 27-Détails des supports du canton de [Mozer, 1978]</i> .....	36
<i>Figure 28-Caractéristiques du maillage</i> .....	38
.....	40
<i>Figure 29- Moment à la base du pylône adjacent au point de bris pour l'essai E20 de MOZER</i> ....	40
.....	40
<i>Figure 30- Cisaillement à la console du pylône adjacent au point de bris pour l'essai E20 de Mozer</i> .....	40
<i>Figure 31-Canton de Mozer [Mozer, 1978]</i> .....	42
<i>Figure 32-Matrice de flexibilité du pylône [Mozer, 1978]</i> .....	43
<i>Figure 33-Caractéristiques géométriques des pylônes [Mozer, 1978]</i> .....	43
<i>Figure 34- Caractéristiques géométrique du pylône de référence</i> .....	44
<i>Figure 35-Section de pylône maillé avec éléments multifibres</i> .....	45
<i>Figure 36-Caractéristiques du maillage du canton de ligne étudié</i> .....	46
<i>Figure 37-Post traitement sous Code_Aster de la mise en flèche des câbles</i> .....	47
<i>Figure 38-Position du point de bris du canton étudié</i> .....	48
<i>Figure 39- Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents incréments de temps- Liso=2,1336m-Tension=25%RTS- Portée =152,4 m</i> .....	49
<i>Figure 40- Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents maillages des pylônes- Liso=2,1336m-Tension=25%RTS- Portée =152,4 m</i> .....	50
<i>Figure 41- Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents maillages des câbles- Liso=2,1336m-Tension=25%RTS- Portée =152,4 m</i> .....	51
<i>Tableau 9- Propriétés de l'onde de propagation</i> .....	51
<i>Figure 42- Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents maillages des câbles- Liso=2,1336m-Tension=25%RTS- Portée =152,4 m</i> .....	52
<i>Figure 43- Courbes contrainte- déformation des lois de comportements étudiées</i> .....	53
<i>Figure 44- Courbe de référence: Moment à la base du pylône adjacent aux points de bris</i> .....	55
<i>Portée =152,4m-Liso=2,1336m-Tension 25%RTS</i> .....	55

<i>Figure 45-Masse volumique du câble conducteur en fonction de sa tension donnée en pourcentage de RTS.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 46-Épaisseur de glace en fonction de la tension du câble donnée en pourcentage de RTS</i>	<i>58</i>
<i>Figure 47-Réponse dynamique d'un bris de câbles en Post traitement sous Code_Aster-Portée=152,4m-Liso=2,1336m-Tension=25%RTS.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 48-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 10%-Comportement élastique.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 49-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 10%-Comportement élastique parfaitement plastique.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 50- Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 10%-Comportement élasto plastique bilinéaire .....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 51-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 50%-Comportement élastique.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 52-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 50%-Comportement élastique parfaitement plastique.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 53-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 50%-Comportement élasto plastique bilinéaire .....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 54-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 55-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m .....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 56-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 57-Nombre de pylônes affectés en fonction de leur capacité-Portée=152,4 m-Liso=2,1336m-Ecoulement élastique.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 58-Structure entourée de glace sur toutes ses composantes .....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 59- Différence entre moments maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris pour le cas sans glace et avec glace sur le pylône-Portée=152,4 m-Liso=2,1336m-Tension=60% RTS-Comportement élastique.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 60-Nombre de pylônes affectés pour le cas avec et sans glace-Portée=152,4 m-Liso=2,1336m-Tension=60% RTS-Comportement élastique.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 61-Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour les différentes longueurs de portées étudiées-Liso=2,1336m-Tension=25%RTS.....</i>	<i>70</i>

<i>Figure 62-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-25% RTS- Liso=2,1336 m-Comportement élastique .....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 63-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-40% RTS- Liso=2,1336 m-Comportement élastique .....</i>	<i>72</i>
<i>Figure 64-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-60% RTS- Liso=2,1336 m-Comportement élastique .....</i>	<i>72</i>
<i>Figure 65-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-25% RTS- Liso=2,1336 m-Comportement élastique parfaitement plastique .....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 66-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-40% RTS- Liso=2,1336 m-Comportement élastique parfaitement plastique .....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 67-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-60% RTS- Liso=2,1336 m-Comportement élastique parfaitement plastique .....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 68-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-25% RTS- Liso=2,1336 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 69-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-40% RTS- Liso=2,1336 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 70-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-60% RTS- Liso=2,1336 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 71-Influence de la loi de comportement sur l'étendue de la cascade-Portée=152,4 m- Liso=2,1336 m.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 72-Influence de la loi de comportement sur l'étendue de la cascade-Portée=304,8 m- Liso=2,1336 m.....</i>	<i>78</i>
<i>.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 73-Influence de la loi de comportement sur l'étendue de la cascade-Portée=457,2 m- Liso=2,1336 m.....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 19-Déplacement en tête -25% RTS - Liso=2,1336m - Loi élasto plastique bilinéaire. ....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 20- Déplacement en tête -75% RTS -Liso=2,1336m – Loi élasto plastique bilinéaire.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 74-Moments élastique à la base du pylône adjacent aux points de bris pour les différentes longueurs d'isolateurs-Portée=152,4m-Tension=25%RTS .....</i>	<i>83</i>
<i>Figure 75-Tension 25% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 76-Tension 30% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 77-Tension 40% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....</i>	<i>85</i>

Figure 78-Tension 50% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	85
Figure 79-Tension 60% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	86
Figure 80-Tension 75% RTS-Portée=152,4 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	86
.....	87
Figure 81-Tension 25% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	87
Figure 82-Tension 30% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	87
Figure 83-Tension 40% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	88
Figure 84-Tension 50% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	88
Figure 85-Tension 60% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	89
Figure 86-Tension 25% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	89
Figure 87-Tension 30% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	90
Figure 88-Tension 40% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	90
Figure 89-Tension 50% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	91
Figure 90-Tension 60% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire .....	91
Figure A.1 - Résultats des tests E de Mozer [Mozer, 1978] .....	95
Figure A.2-Réponse dynamique série E- Cas E20C et E20D .....	96
[Mozer, 1978] .....	96
Figure B.1-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique-Portée=304,8 m- Liso=2,1336m .....	97
Figure B.2-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=304,8 m- Liso=2,1336m .....	97
Figure B.3 -Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=304,8 m- Liso=2,1336m .....	98
Figure B.4 -Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique-Portée=457,2 m- Liso=2,1336m .....	98
Figure B.5 -Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=457,2 m- Liso=2,1336m .....	99
Figure B.6 -Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=457,2 m- Liso=2,1336m .....	99
Figure B.7 -Comportement élastique-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m .....	100

Figure B.8 -Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m .....	100
Figure B.9 -Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m .....	101
Figure B.10 -Comportement élastique-Portée=304,8 m-Liso=2,1336 m.....	101
Figure B.11 -Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=304,8 m-Liso=2,1336 m .....	102
.....	102
Figure B.12 –Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=304,8 m-Liso=2,1336 m ....	102
Figure B.13 -Comportement élastique-Portée=457,2 m-Liso=2,1336 m.....	103
Figure B.14 -Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=457,2 m-Liso=2,1336 m .....	103
Figure B.15 –Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=457,2 m-Liso=2,1336 m ....	104
Figure B.16 -Liso=2,1336 m-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	104
Figure B.17 -Liso=4,2672 m-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	105
Figure B.18 -Liso=0 m-Portée=304,8 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	105
Figure B.19 -Liso=2,1336 m-Portée=304,8 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	106
Figure B.20 -Liso=4,2672 m-Portée=304,8 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	106
Figure B.21 -Liso=0 m-Portée=457,2 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	107
Figure B.22 -Liso=2,1336 m-Portée=457,2 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	107
Figure B.23 -Liso=4,2672 m-Portée=457,2 m-Comportement élasto plastique bilinéaire .....	108
<i>Tableau 22- Caractéristiques mécaniques de la section en mètre.....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 91- Profilé W410X46.....</i>	<i>110</i>
<i>Figure 92- Caractéristiques géométrique de la section W410X46 .....</i>	<i>110</i>
<i>Figure93- Courbe contrainte déformation d'un acier à comportement élasto plastique avec un écrouissage linéaire.....</i>	<i>111</i>
<i>Figure 94- Conditions aux limites et .....</i>	<i>111</i>
<i>chargement .....</i>	<i>111</i>
<i>Figure 95- Maillage linéique de la poutre W410x46.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 96- Maillage de la section de la poutre w410x46 en multifibres.....</i>	<i>112</i>



<i>Figure 97-Position de l'axe neutre pour la section de la poutre w410x46.....</i>	<i>113</i>
<i>Tableau 24- Contraintes calculées dans les fibres analytiquement .....</i>	<i>114</i>
<i>Tableau 25- Contraintes calculées dans les fibres par Code_Aster.....</i>	<i>115</i>
<i>Tableau 26- Erreur relative entre le calcul analytique et le calcul expérimental.....</i>	<i>117</i>
<i>Figure 98- Courbe force déplacement .....</i>	<i>118</i>



# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-Résultats des essais avec pylône élastique [Peabody, 2004] .....	5
Tableau 2 - Relation de similitude [Kempner, 1997] .....	14
Tableau 3- Influence du paramètre $\gamma$ sur la stabilité de l'opérateur .....	25
Tableau 4 - Influence du paramètre $\beta$ sur la stabilité de l'opérateur .....	26
Tableau 5 - Influence du paramètre $\theta$ sur la stabilité de l'opérateur [McClure et Tinawi, 1988] ..	27
Tableau 6- Longueur des portées et de la chaîne d'isolateur .....	34
Tableau 7-Paramètres d'entrée sous Code_Aster .....	37
Tableau 8- Écart entre la modélisation élastique et l'essai expérimental .....	41
Tableau 10-Caractéristiques des pylônes de référence .....	55
Tableau 11- Caractéristiques géométrique des sections des pylônes étudiées pour les différentes longueurs de portées et longueurs des chaînes d'isolateurs. ....	56
Tableau 12-Liso=2,1336m-Portée=152,4m-Tension=25%RTS-Élastique .....	59
Tableau 13- Paramètres du cas de référence .....	60
Tableau 14-Paramètres d'entrée sous Code_Aster de la structure avec glace .....	68
Tableau 15-Influence de la longueur de portée sur la réponse dynamique.....	70
Tableau 16-Influence de la loi de comportement sur le nombre de pylônes plastifiés .....	77
Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m .....	77
Tableau 17-Influence de la loi de comportement sur le nombre de pylônes plastifiés .....	78
Portée=304,8 m-Liso=2,1336 m .....	78
Tableau 18- Influence de la loi de comportement sur le nombre de pylônes plastifiés .....	79
Portée=457,2 m-Liso=2,1336 m .....	79
Tableau 21-Influence de la longueur des chaînes d'isolateurs vis-à-vis les autres paramètres d'études sur l'étendue de la cascade .....	92
Tableau 22- Caractéristiques mécaniques de la section en mètre .....	
Tableau 23- Détails de chargement .....	113
Tableau 24-Contraintes calculées dans les fibres analytiquement.....	114
Tableau 25-Contraintes calculées dans les fibres par Code_Aster .....	115

Tableau 26-Erreur relative entre le calcul analytique et le calcul expérimental .....	117
Tableau 27- Comparaison entre le déplacement du calcul analytique et celui de Code_Aster .....	

# LISTE DES ACRONYMES

<b>Acronyme</b>	<b>Définition</b>
UdeS	Université de Sherbrooke
EPRI	Electric Power Research Institute
EDF	Électricité de France
RTS	Rated Tensile Strength



# CHAPITRE I. INTRODUCTION

## 1. Historique des lignes

L'acheminement de l'électricité nécessite des structures capables de la transporter depuis les centres de production aux centres de distribution en fonction des besoins des consommateurs. C'est en 1869 après l'invention de la dynamo (génératrice de courant continu) par l'électricien belge Zénobe Gramme que l'idée d'installation des réseaux de transport a vu le jour par l'inventeur et l'industriel américain Thomas Edison qui fonde en 1878 l'Edison Electric Light company devenue en 1892 General Electric. Edison dépose par la suite le brevet de l'ampoule en 1879 puis crée le réseau électrique de New York à courant continu qui fut le premier réseau de transport d'énergie électrique au monde, et qui avait essentiellement pour but l'éclairage. Cependant, en 1879, Tesla invente l'alternateur triphasé qui a permis l'installation de la première ligne au monde à courant alternatif de 175 km de long à Francfort en Allemagne. Après la bataille décisive du projet d'alimentation électrique de l'industrie Buffalo entre Edison qui proposait une alimentation en courant continu et Tesla et Westinghouse qui proposaient une alimentation en courant alternatif. Le projet a été remporté finalement par Tesla et Westinghouse, [[http://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau\\_électrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_électrique)]. Depuis, le secteur du transport d'électricité se développe de manière continue surtout après la mise en service de la première ligne industrielle en triphasé après avoir imposé universellement le courant alternatif triphasé comme moyen de transport de l'énergie électrique sur de longues distances.

## 2. Mise en contexte

De nos jours, les lignes de transport d'énergie électrique se définissent comme étant l'ensemble d'infrastructures permettant l'acheminement de l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Cependant les concepteurs de lignes de transport les définissent comme étant des supports verticaux appelés pylônes, qui maintiennent les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles. Ces structures sont conçues généralement en famille selon des critères globaux définis par la norme de conception en vigueur et d'autres critères plus particuliers tirés principalement de l'expérience et des sinistres vécus auparavant et établies par les entreprises productrice de cette énergie. En plus des charges climatiques, d'entretien et de construction, ces structures sont soumises à des charges de type dynamique non prises en compte directement par les normes en vigueur telles que la chute d'un pylône, une erreur humaine, une collision ou le bris d'un composant qui créent une onde de choc dans le conducteur qui se transfère aux points d'attaches avec le support (isolateur).

Ces efforts dynamiques peuvent conduire à des endommagements des structures pouvant aller jusqu'à la rupture du pylône. Si elle n'est pas contrôlée, la ruine peut se propager et former une cascade.



Figure 1- Catastrophe de verglas Montréal, janvier 1998

Cependant, la prise en compte de ces charges dynamiques lors de la conception des structures n'est pas économique pour les entreprises.

Plusieurs études ont été faites afin de répondre à cette problématique et satisfaire une réduction des risques, comme l'insertion des pylônes anti-cascades ou l'ajout des pinces fusibles à la console qui supporte les câbles conducteurs. Ces méthodes permettent le confinement des ruines, ce qui représente une alternative intéressante à une conception de l'ensemble des pylônes pour résister aux charges maximales de bris de conducteur et aux autres charges longitudinales accidentelles. Cependant, pour mieux comprendre le confinement des ruines et optimiser les stratégies de conception, il est important de bien connaître les phénomènes de cascade de lignes et de pouvoir prédire l'étendue de cascades en fonction des charges de conception des pylônes.

### 3. Description sommaire d'une ligne aérienne

Une ligne aérienne de transport d'énergie électrique compte principalement quatre composants : les câbles conducteurs, les supports, les câbles de gardes et les isolateurs.

Les pylônes ou supports maintiennent les câbles à une certaine distance du sol. On trouve plusieurs types de pylônes : pylône en treillis traditionnel, pylône haubané, pylône tubulaire, pylône en béton et pylône en bois.



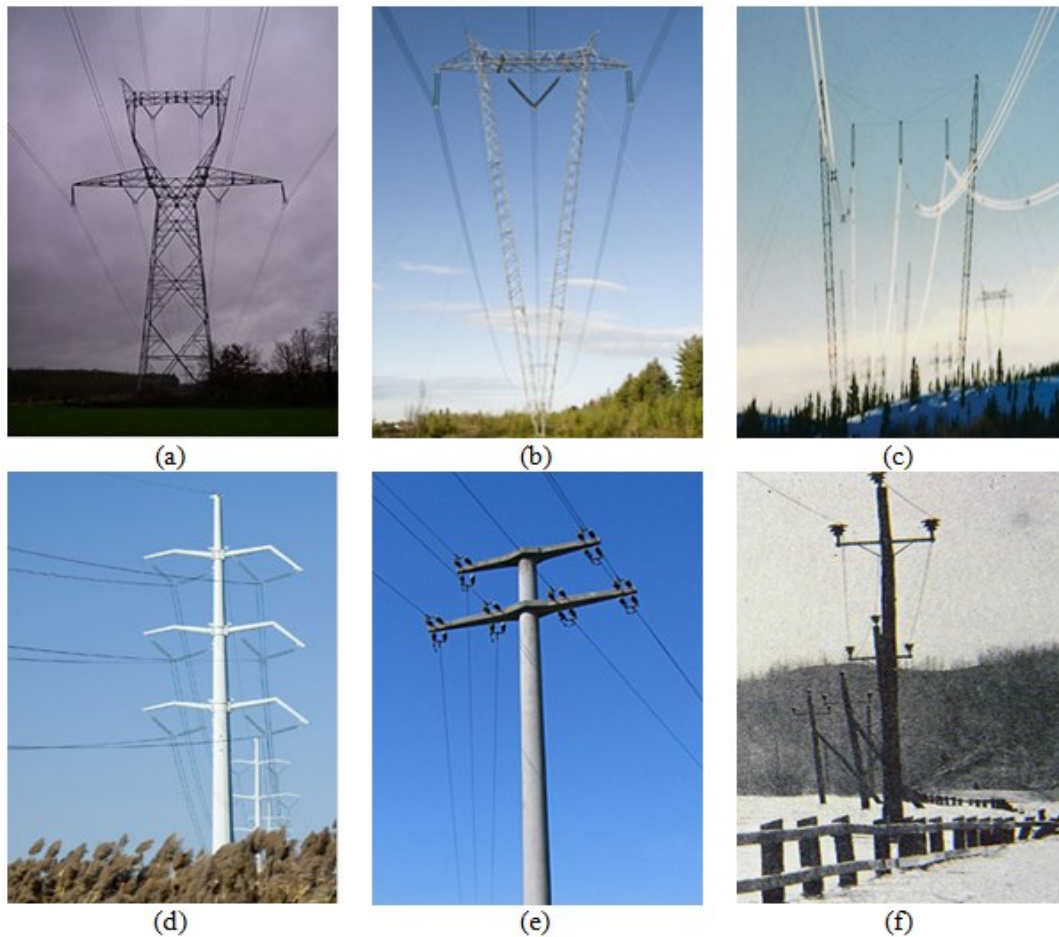


Figure 2 - Exemples de pylônes: (a) pylône autoporteur en treillis; (b) pylône haubané en V; (c) pylône à chaînette; (d) pylône tubulaire; (e) pylône en béton; (f) pylône en bois

Les câbles conducteurs transportent le courant électrique. Ils sont sous tension électrique et non isolés pour limiter le poids et le coût, généralement sous forme triphasée, avec au moins trois phases de conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs (le plus souvent de deux à quatre) à la place d'un conducteur afin de limiter les pertes et d'augmenter la puissance pouvant transiter.

Les câbles de gardes ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs et jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant la foudre pour éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs. Ils sont en général faits en acier. Ils sont parfois utilisés comme réseau de communication.

Les câbles conducteurs et les câbles de gardes sont mis en flèche. La mise en flèche est l'opération effectuée pour monter un conducteur entre deux pylônes afin de respecter la tension mécanique prévue par les concepteurs.

Finalement, les isolateurs ont un rôle à la fois mécanique (fixation des conducteurs) et électrique (isolation électrique) et sont construits en verre, en céramique ou en matériau synthétique.

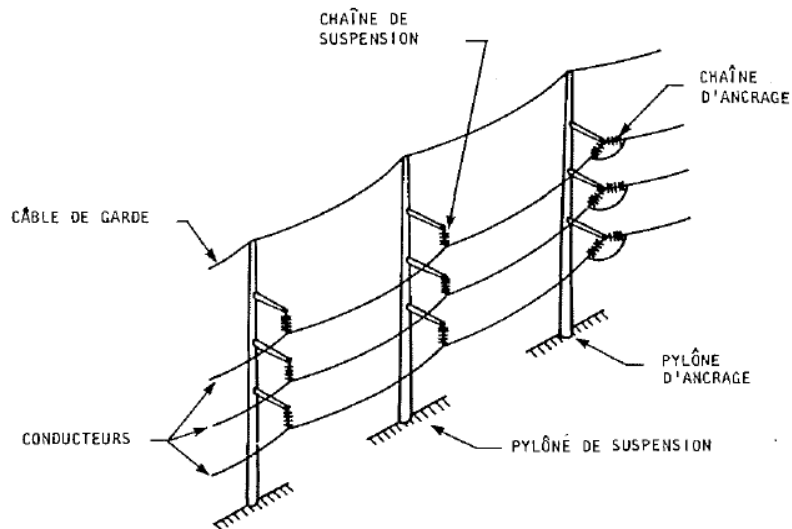


Figure 3 - Schéma des composants structuraux d'une ligne aérienne [McClure et Tinawi, 1988]

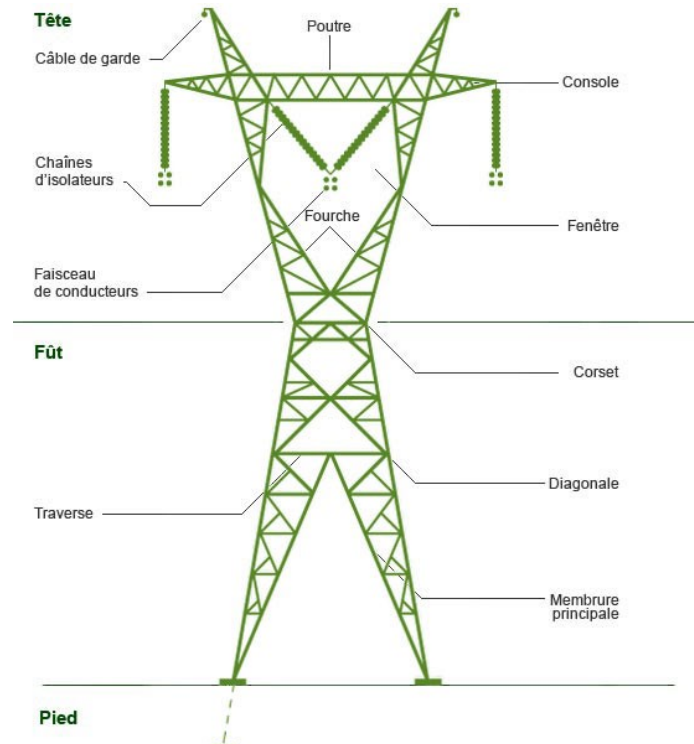


Figure 4 - Composants d'un pylône [Source: Hydro-Québec]

#### 4. Cascade des lignes de transport définition et historique

Le phénomène de cascades n'est pas une problématique nouvelle dans l'histoire des lignes de transport. Plusieurs cas de cascades ont été vécus partout dans le monde menant même à des catastrophes.

On rappelle dans ce paragraphe l'une des célèbres ruines en cascades des lignes de transport comme celle vécue au Danemark en 1966 et qui a conduit à la destruction de 167 pylônes de 150-kV. En 1975 au Wisconsin, 262 pylônes en treillis et 393 portiques de bois ont été détruits suite à un bris de conducteur.

Beaucoup d'autres accidents similaires ont été vécu au cours de l'histoire des lignes comme celles du Québec en 1973, de l'Inde 1975, la crise de verglas au Québec en 1998, etc.

Le tableau 1 rappelle quelques cascades importantes des lignes de transport dans le monde.

*Tableau 1-Résultats des essais avec pylône élastique [Peabody, 2004]*

Date	Lieux	Nombre de structure	Date	Lieux	Nombre de structure
1921	Nouvelle-Angleterre	69	1975	Indiana	49
1921	Nouvelle-Angleterre	78	1975	Wisconsin	31
1924	Nouvelle-Angleterre	94	1975	Wisconsin	262
1940	Ontario	100	1975	Wisconsin	393
1966	Danemark	167	1975	Wisconsin	289
1969	Québec	4	1975	Wisconsin	53
1969	Québec	17	1980	Wisconsin	227
1972	Colombie-Britannique	21	1983	Dakota	40
1972	Wisconsin	32	1993	Nebraska	297
1973	Québec	2x16	1993	Nebraska	177



## CHAPITRE II. ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LE CONFINEMENT DES RUINES

Les études et les recherches entreprises au cours de l'histoire des lignes de transport supposent principalement 3 méthodes pour étudier les ruines :

- i. Méthode expérimentale à grandeur nature (échelle 1:1).
- ii. Méthode expérimentale à échelle réduite.
- iii. Méthodes analytique et numérique.

### 1. Études expérimentales

#### 1.1. Essais à grandeur nature

Peu d'essais de bris de conducteur à échelle réelle ont été faits. La difficulté principale réside du fait que la réalisation de ce genre d'essais requiert un budget élevé. De plus, il est très difficile de varier certains paramètres tels que la tension des câbles, la rigidité des structures, la longueur des portées, la charge gravitaire, la flèche des câbles.

Haro *et al* [1956] ont effectué des essais à échelle réelle avec des lignes de 110 et 220 kV.

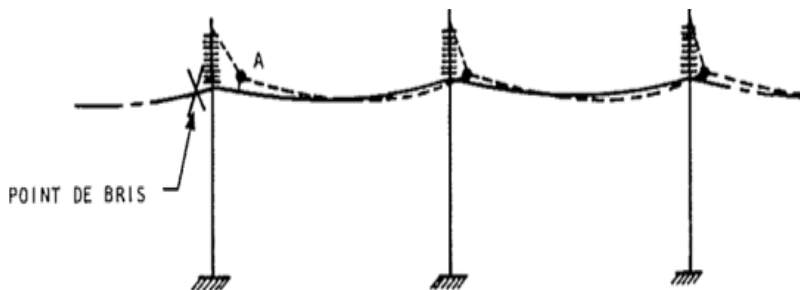


Figure 5-Essais à échelle réelle [Haro et al, 1956]

L'étude avait pour but d'étudier le caractère dynamique après rupture du câble au point d'attache adjacent au bris, et de relever l'historique du déplacement longitudinal de ce même point. Les résultats obtenus à partir de cette étude (figure 6) montrent que la traction décroît rapidement dans la portée adjacente au bris jusqu'à 5 à 10% de la valeur initiale juste après le bris et reste stable pendant quelques dixièmes de seconde puis augmente pour atteindre sa première pointe qui sera par la suite suivie d'une série de pointes et de creux jusqu'à dissipation complète de l'énergie mécanique absorbée par amortissement lors du balancement des chaînes d'isolateurs. Arrivé au

deuxième support, l'effort longitudinal donne naissance à une onde réfléchiée qui crée des pointes considérables sur le premier support souvent supérieur à la première pointe de l'onde incidente.

Govers [1970], Frandsen et Juul [1976], Mozer [1978], Peyrot *et al* [1980] et Richardson [1987] ont tous confirmé ces observations globales lors des essais sur modèles réduits ou sur tronçons de lignes grandeur nature.

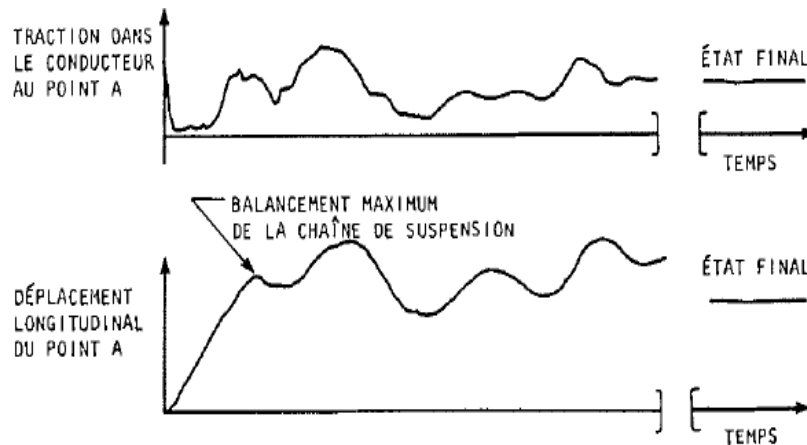


Figure 6-Réponse typique d'une section de ligne soumise à un bris de conducteur [Haro *et al*, 1956]

En 1978, EPRI (Electric Power Research Institute) a effectué un essai de bris de conducteur sur un canton de ligne [Peyrot *et al*, 1978]. L'essai avait pour objectif d'effectuer une rupture en cascade des pylônes composant le canton à l'étude. Cependant, l'essai n'a enregistré aucune défaillance dans les pylônes. En contrepartie, il a démontré l'aspect conservateur dont jouissent les pylônes en treillis, et ainsi a aidé à mieux comprendre le phénomène physique d'un canton de ligne soumis à un bris de conducteur.

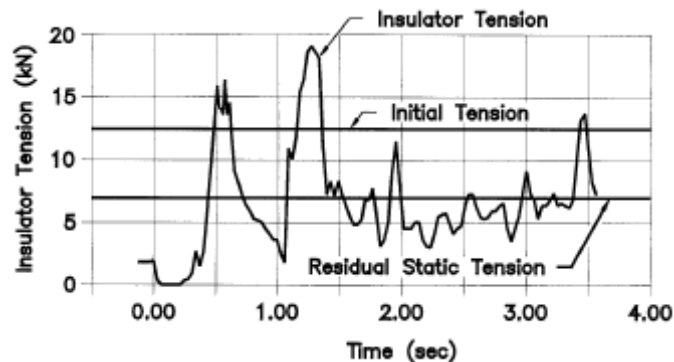


Figure 7-Bris de conducteur [Peyrot *et al*, 1978]

En effet, à l'instant  $t=0$  sec, une force statique équivalente au poids du conducteur pour la moitié de la portée est placée à l'extrémité libre de la chaîne de suspension. À cet instant une coupure dans le câble à proximité de la chaîne d'isolateur est effectuée.

La réponse dynamique montre que la tension de l'isolateur initialement non nul décline rapidement jusqu'à atteindre 0 kN, reste nulle quelques dixièmes de secondes jusqu'à l'alignement de la chaîne

d'isolateur avec le câble, puis augmente linéairement et dépasse sa tension initiale pour atteindre son premier pic à 0,6 sec.

La chaîne d'isolateur continue de balancer. Sa tension diminue à nouveau due au poids du câble qui essaye de compenser le déséquilibre par basculement puis atteint son maximum au deuxième pic à 1,2 sec. À partir de cet instant ( $t=1,2$  sec), l'effet dynamique transitoire diminue par amortissement. La tension de l'isolateur continue à osciller selon des périodes de courtes durées autour de sa tension statique résiduelle puis demeure égale à cette dernière.

La réponse dynamique de cet essai est similaire à celle effectuée par Haro *et al* [1956], cependant celle-ci montre clairement qu'un bris de conducteur sous tension initiale provenant uniquement du poids du câble engendre des efforts dynamiques longitudinaux importants qui dépassent la tension statique résiduelle.

## 1.2. Essais à échelle réduite

Contrairement aux études à échelle réelle, les études à échelle réduite sont plus économiques et plus variées vu qu'il est plus facile de modifier les paramètres de la ligne.

Plusieurs essais de bris de conducteurs ont été effectués sur des modèles réduits. Les études antérieures réalisées sur modèles à échelles réduites ne modélisent que la charge d'impact longitudinale résultante d'un bris de conducteur et ne prennent pas en compte la modélisation des ruines des pylônes.

Des travaux à échelle réduite ont été réalisés par Mozer *et al* [1981], Richardson [1987], Kempner [1997] et Bérubé [2011] et qui ont utilisé les facteurs d'échelle 1/30, 1/40 ou 1/50.

### 1.2.1. Travaux de Mozer [1978]

Les études de Mozer [1978] ont été faites pour le compte de l'Electric Power Research Institute (EPRI), et portaient sur l'analyse de la réponse dynamique des pylônes face aux bris de conducteurs d'une part et à la chute de glace d'autre part.

Ses études comprenaient un calcul par ordinateur de la tension résiduelle lors d'un bris de conducteur ainsi qu'une cinquantaine d'essais à échelle réduite sur un banc d'essai comprenant 3 portées reposant sur 2 pylônes comme le montre la figure 8.

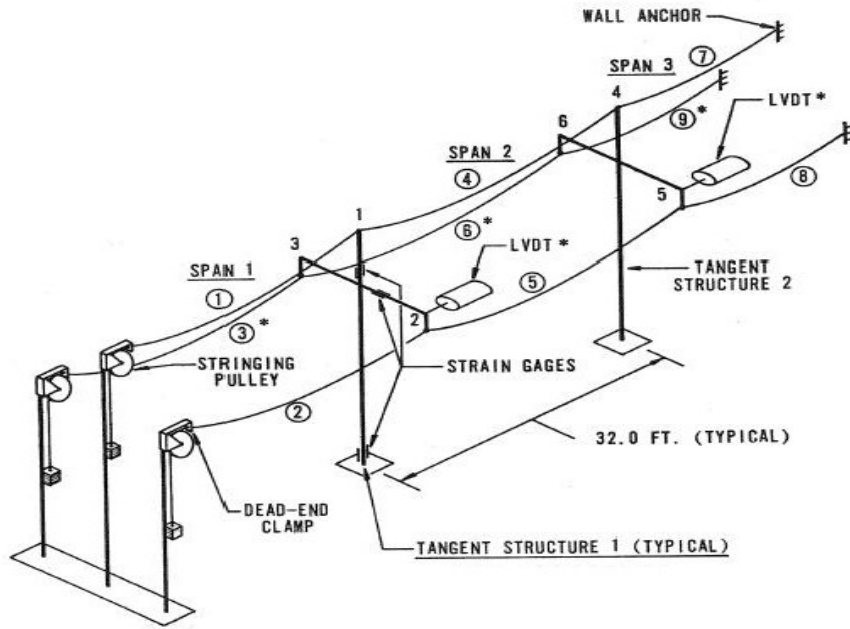


Figure 8-Modèle d'étude de [Mozer, 1978]

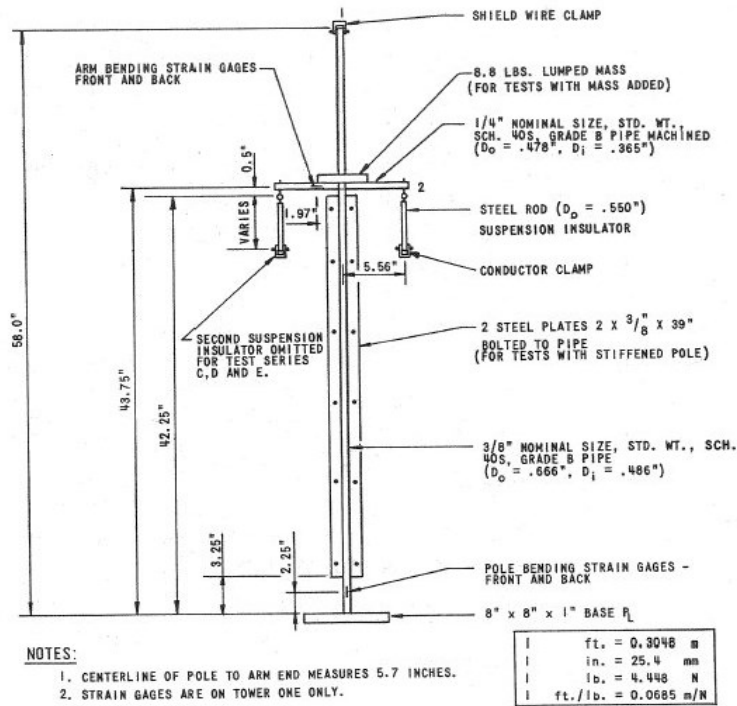


Figure 9-Détail structure à échelle réduite [Mozer, 1978]



Mozer a conclu suite à ses travaux que l'analyse dynamique des pylônes faces à un bris de conducteur doit tenir compte de l'ensemble de la structure. En effet il remarquait lors de ses essais que les efforts repris par la base du pylône sont parfois supérieurs et parfois inférieurs à ceux repris par la console. De ce fait Mozer a conclu qu'il est impérativement nécessaire d'analyser l'ensemble de la structure et ne pas la concentrer sur un élément. Les valeurs des coefficients d'impact obtenu lors de ses essais concordent bien avec ceux obtenus avec l'équation de Peyrot.

$$IF_A = 1 + w \cdot \left( \frac{2 \cdot |E|}{w_c \cdot L \cdot g} \right)^{0.5} \quad (1)$$

Avec

- $IF_A$  : facteur d'amplification dynamique.
- $w$  : pulsation propre du conducteur à sa tension résiduelle.
- $w_c L$  : masse du conducteur.
- $g$  : accélération gravitationnelle.
- $E$  : changement d'énergie du conducteur entre la position initiale et finale.

Les travaux de Mozer ont montré aussi que la longueur des chaînes d'isolateurs ainsi que la longueur des portées influençaient beaucoup la réponse du système. Il a traduit ces résultats à travers le graphique de la figure 10:

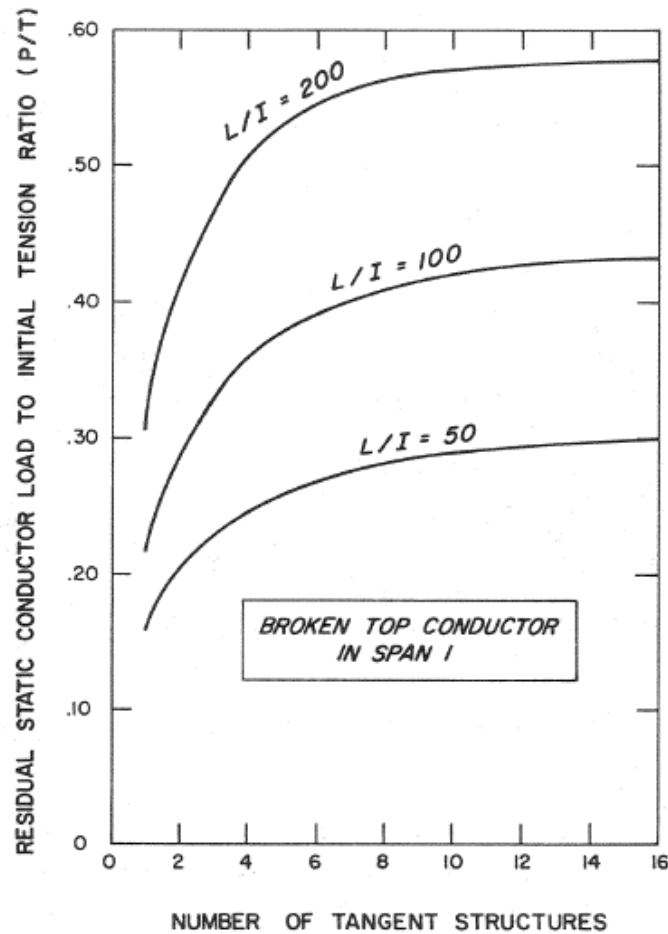


Figure 10-Influence du ratio porté longueur des chaînes d'isolateurs sur la réponse dynamique [Mozer, 1978]

Il remarqua cependant, que plus le ratio (Portée/Isolateur) est grand plus la charge statique résiduelle est élevée et que pour une portée et tension dans les câbles donnés, la grandeur des efforts dynamiques due à la rupture de câble est inversement proportionnelle à la longueur des chaînes d'isolateurs.

Ses courbes montrent parallèlement qu'au-delà de la seizième structure la charge statique résiduelle devient presque constante. Par conséquent, Mozer a constaté qu'il est inutile d'inclure plus que seize structures lors d'un chargement longitudinal et qu'à partir de la seizième structure la réponse sera la même partout.

Par ailleurs, Mozer a étudié l'influence de la position de bris vis-à-vis le moment maximum engendré à la base du pylône adjacent au bris.

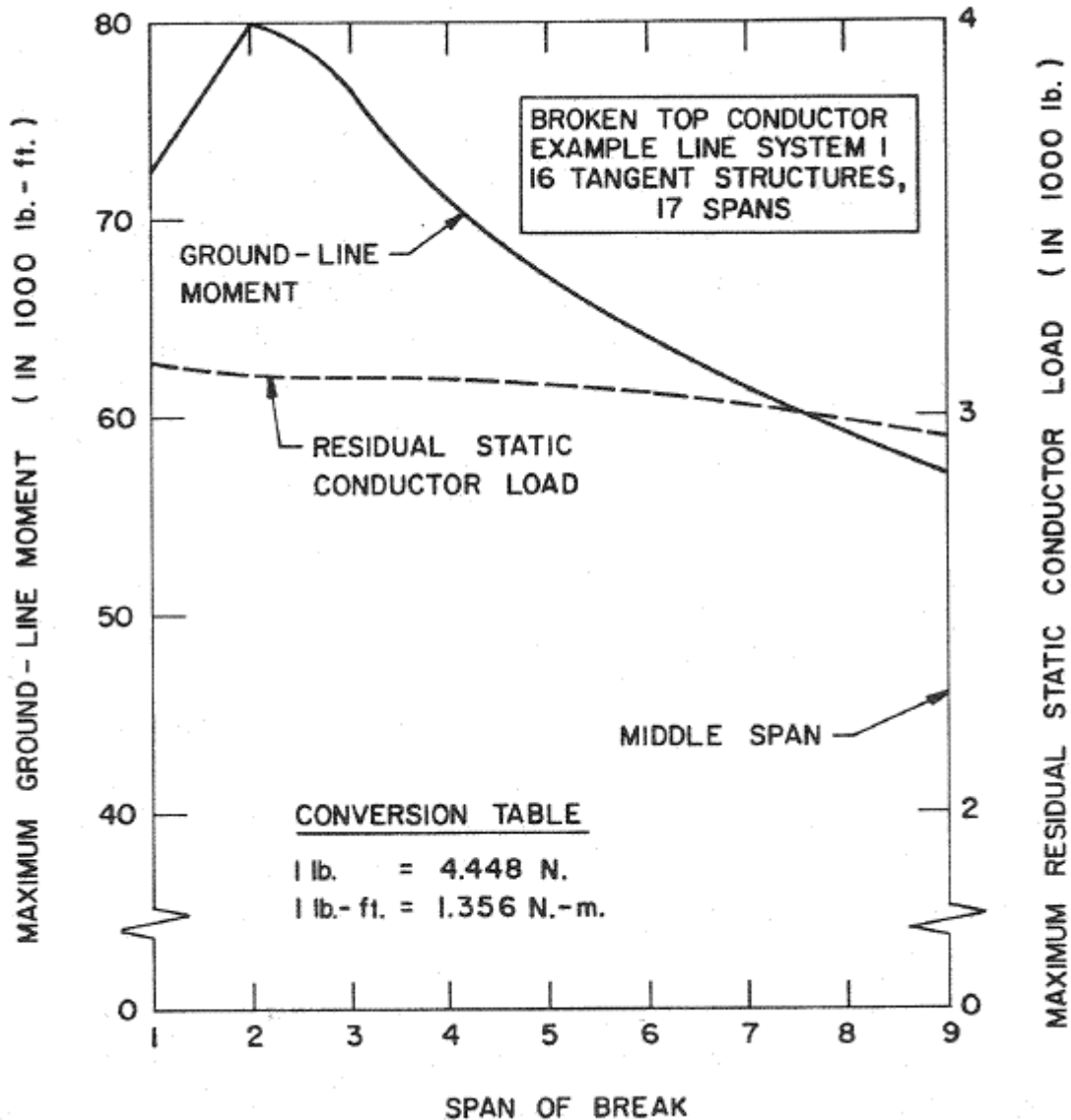


Figure 11-Influence de la position de bris sur le moment maximum à la base du pylône adjacent au point de bris [Mozer, 1978]

Suite à cette étude, Mozer a conclu que le moment maximum se produit à la première structure adjacente au point de bris lorsque la rupture est localisée à la première travée.

### 1.2.2. Travaux de Kempner [1997]

Les travaux de Kempner [1997] portaient essentiellement sur l'étude de deux types de conducteurs : un câble en acier auquel des masses ponctuelles ont été ajoutées et une chaîne. Cependant, la difficulté réside en l'atteinte de l'échelle de similitude dynamique.

Kempner définit deux paramètres pour atteindre l'échelle de similitude dynamique : un paramètre géométrique et un autre temporel qu'on résume au tableau 2 :

Tableau 2 - Relation de similitude [Kempner, 1997]

<i>Paramètre</i>	<i>Échelle modèle</i>
<i>Dimensions</i>	$1/(\text{facteur d'échelle})$
<i>Temps</i>	$1/(\text{facteur d'échelle})^2$

Il établit par conséquent une relation qui présente le facteur d'échelle d'une ligne à échelle réduite comme étant le facteur de l'élasticité dynamique du conducteur.

$$\text{Élasticité dynamique du conducteur} = \frac{A_{\text{câble}} E_{\text{câble}}}{W_{\text{câble}}} \text{ mètre} \quad (2)$$

Avec :

- $A_{\text{câble}}$  : aire du câble.
- $E_{\text{câble}}$  : module élastique du câble.
- $W_{\text{câble}}$  : poids linéique du câble.

Il démontre suite à ses travaux que l'amortissement du câble d'acier présentait la moitié de celui de la chaîne, soit 1,65% d'amortissement visqueux proportionnel pour la chaîne contre 0,71% pour celui du câble d'acier. De ce fait, Kempner recommande l'utilisation d'un câble d'acier pour la représentation du conducteur.

Kempner a conçu pour ses études un modèle réduit qui traduit la rigidité et la fréquence naturelle des pylônes réels. La rigidité et la fréquence naturelle ont été contrôlées respectivement à l'aide des ressorts de rigidités différentes et une masse supplémentaire placée au niveau du tube pylône. Le modèle réduit établi par Kempner [1997] est représenté par un tube rotule à sa base dont la rigidité est contrôlée par un ressort comme la montre la figure 12 :

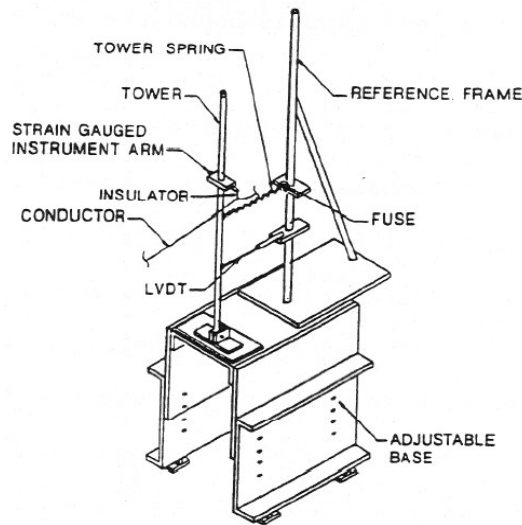


Figure 12-Modèle d'étude de la réponse au bris d'un conducteur [Kempner, 1997]

Les travaux de Kempner ont montré que le facteur d'amplification dynamique se situe entre 0,894 et 2,194 fois la tension initiale. Il recommande par conséquent l'utilisation d'un facteur de 1,359 fois la tension horizontale initiale pour la conception des structures résistantes à la totalité de l'effort dynamique et un facteur de 0,768 fois la tension horizontale pour la conception des structures d'alignement qui résistent à une partie de l'effort dynamique.

### 1.2.3. Travaux de Bérubé [2011]

Les travaux de Bérubé [2011] avaient pour objectif d'évaluer le comportement d'une ligne de transport munie de console-fusibles ductile en variant la tension initiale du conducteur, la rigidité du pylône et la longueur des chaînes d'isolateurs.

Son étude comprenait principalement deux phases : la première étant d'effectuer des essais de bris de conducteur sur un banc d'essai à échelle réduite et la deuxième est une phase de validation par logiciel d'éléments finis Code\_ Aster.

Bérubé s'est inspiré des travaux de Mozer et Kempner pour concevoir son modèle réduit.

Son montage de longueur totale de 37,5 m est composé de 5 portées de 7,5 m chacune reposant sur 4 pylônes d'alignements et 2 pylônes d'arrêts.

La flexibilité ainsi que la fréquence naturelle du pylône sont contrôlées par une plaque concentrée à sa base (figure 13). Deux types de plaques ont été utilisées : une en acier de dimensions 80x75 mm et l'autre en aluminium de dimensions 80x100 mm.

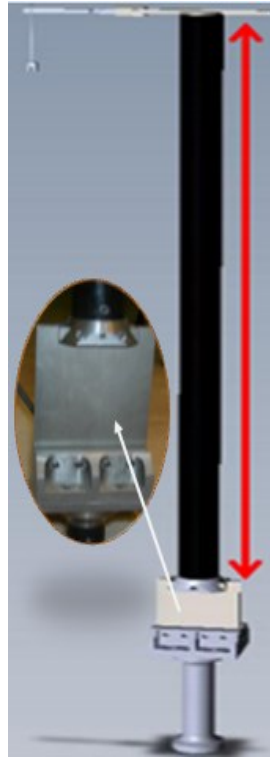


Figure 13-Base pylône d'alignement [Bérubé, 2011]

La console est conçue avec une entaille permettant de limiter la capacité maximale en flexion.

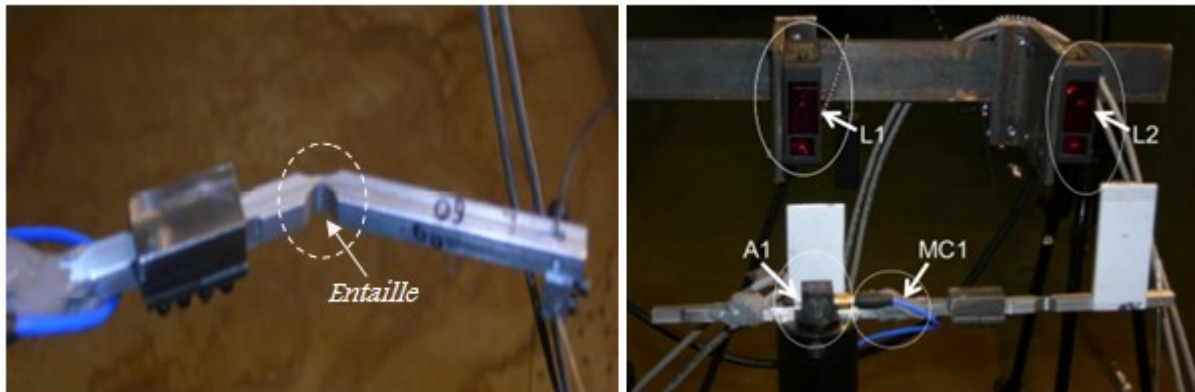


Figure 14-Fusible ductile [Bérubé, 2011]

Les études expérimentales de Bérubé ont pu conclure que l'insertion d'un fusible ductile à la console permet de réduire les efforts à la base du pylône soumis à un bris de conducteur jusqu'à 33% à la base du pylône adjacent au point de bris et jusqu'à 25% pour l'ensemble du canton. Son modèle numérique, développé à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis Code\_Aster a pu valider en premier lieu les essais effectués antérieurement par Mozer [1978] sur des pylônes à comportement élastique avec une erreur de 5 à 10% puis de valider ses essais à comportement

dynamique non linéaire avec ajout de mécanisme ductile à la console avec une erreur variant de 10 à 20%.

Bien que l'approche d'essais à échelle réduite est simple, économique et tient compte d'une variété de paramètres, elle présente toujours des inconvénients et ne reflète pas nécessairement les résultats réels vu les hypothèses simplificatrices adoptées et la non-prise en compte des propriétés géométriques et matérielles réelles de la ligne ce qui rend difficile l'extrapolation des conclusions à des vraies lignes de transport.

## 2. Méthodes analytique et numérique

Les études analytiques les plus intéressantes traitant le bris de conducteur ont été menées par Thomas [1981] et EPRI [1978]. Ses études s'adressent uniquement à l'effet du bris de conducteur et ne prennent pas en mesure la défaillance du pylône.

Les études de Thomas [1981] ont été faites en parallèle avec le développement du programme d'analyse CABLE7. Thomas a réalisé plus de 200 simulations numériques étudiant les effets de la rigidité du pylône, la tension initiale des conducteurs, la portée des câbles, la longueur des chaînes d'isolateur, et la réponse dynamique du premier pylône adjacent au point de rupture du câble.

Les résultats obtenus suite à ses études montrent que la tension mécanique initiale et la portée du câble sont les paramètres les plus importants pour déterminer l'effet de la charge longitudinale d'impact sur le premier pylône. Outre, la rigidité du pylône et la longueur de la chaîne d'isolateur sont d'importance moindre, mais aussi significative pour la détermination de cet effet.

Les études faites par EPRI [1978] ont été menées pour développer des graphiques et des tableaux des charges longitudinales statiques et dynamiques lors d'un bris de câble. EPRI s'est servie de l'outil informatique BRODII (BROkenwire and Differential Ice Analysis, Version1) pour déterminer la charge statique résiduelle.

### 2.1. Notion de facteur d'impact

Suite à un bris de câble, des efforts dynamiques se produisent le long des câbles et se propagent dans sa direction en créant des sommets de courte durée dont il est difficile d'évaluer l'intensité. De ce fait le calcul de la résistance des lignes face aux charges dynamiques s'est basé toujours sur des méthodes statiques équivalentes. Paris [1960], Govers [1970] et Bennett [1971] ont introduit des facteurs d'impact servant à l'utilisation dans des méthodes statiques équivalentes.

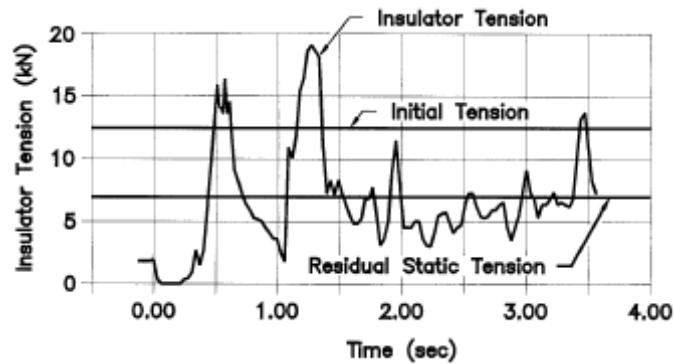


Figure 15 -Influence du facteur d'impact dans l'étude dynamique [Peyrot et al, 1978]

En effet, le rôle des facteurs d'impact est de fournir une estimation de la force longitudinale maximale pour laquelle la structure adjacente au point de bris peut être soumise. Il s'agit d'une traduction mathématique simple et efficace pour rendre le problème dynamique en un problème statique équivalent. Le facteur d'impact est défini comme le rapport de la tension de crête à la tension résiduelle après atteinte d'équilibre. Cependant, d'autres chercheurs le définissent comme le rapport de la tension de crête à la tension du câble à nu.

La figure 15 montre une réponse dynamique d'un isolateur soumis à un bris de conducteur. La valeur de la tension maximale de crête ainsi que celle de la tension résiduelle sont très importantes pour la détermination du facteur d'impact qui servira par la suite à l'analyse dynamique.

Ces facteurs ont été déterminés suite à des essais à échelle réduite. L'étude de Govers [1970] consistait à analyser une série de résultats sur pylônes à treillis rigides autoporteurs. Son étude a permis d'établir des abaques qui mettent en évidence le choix du facteur d'amplification dynamique avec le ratio (portée/flèche) et le ratio (portée/longueur) de la tige de suspension.

Suite à ces études, Govers a démontré que la longueur de la chaîne de suspension a plus d'importance que la flèche relative qui est en rapport direct avec la tension initiale du câble. Par ailleurs, Govers remarqua que plus la tension initiale est élevée plus les charges transitoires induites sont élevées et que cet effet est plus accentué si la longueur des assemblages de suspension est courte. Ces constatations confirment celles de Comellini et Manuzio [1968].

Sept ans plus tard Mozer *et al* [1977] ont aussi effectué des études analogues à celles des études de Govers [1970] sur des supports plus flexibles. Ils ont proposé un modèle mathématique de calcul du facteur d'impact, mais cette fois-ci leurs études conduisaient à des facteurs d'impact plus petit que ceux prédits par Govers et allant même dans certains cas à 2 fois plus petits. Ils ont expliqué par la suite que la flexibilité des supports permet de mobiliser l'interaction dynamique des portées adjacentes dans le canton.

Cependant, Luminis, dans la discussion de l'article de Mozer *et al* [1977] voyait que les résultats obtenus par Mozer *et al* [1977] ainsi que par Govers [1970] satisfaisaient comme mesure approximative de la résistance statique d'un système rigide. En revanche, un système flexible suggère un critère énergétique pour la mesure de la résistance dynamique du système. Ce critère énergétique a été adopté plus tard par Peyrot *et al* [1980] et qui a permis de développer des modèles



théoriques pour le calcul des facteurs d'impact qui tient compte de la perte d'énergie potentielle gravitationnelle et la dissipation d'énergie de déformation lors d'un bris de conducteur simultanément entre le câble et le support.

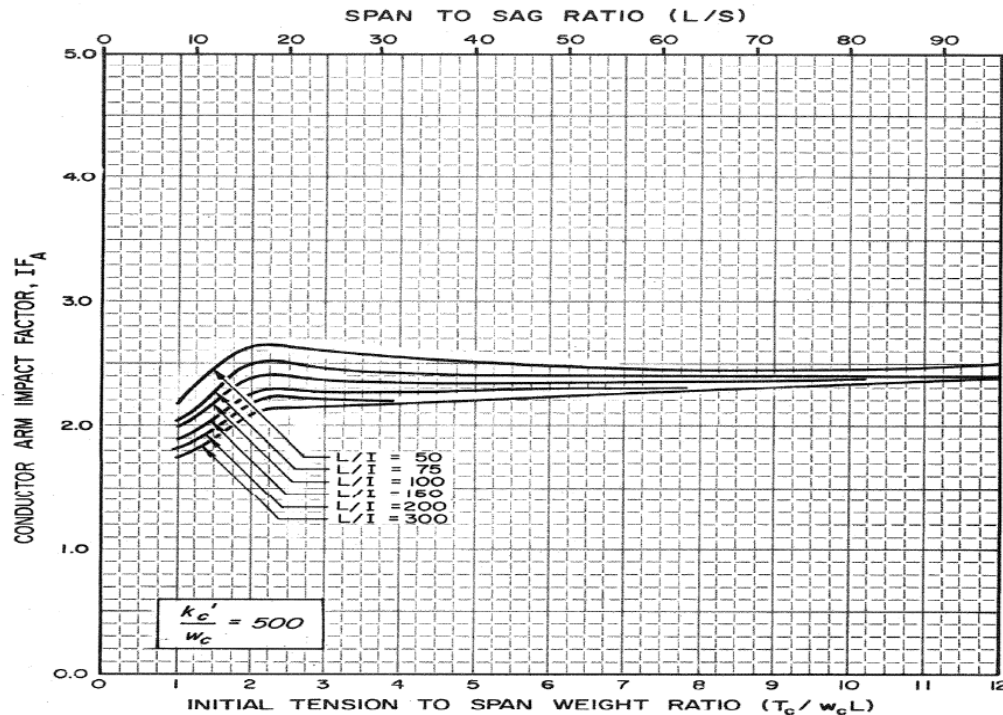


Figure 16-Facteur d'impact selon Mozer [Mozer, 1978]

Bien que l'utilisation des facteurs d'impact semble être l'outil principal permettant d'estimer les forces longitudinales maximales pouvant s'appliquer à la structure voisine à la position de bris, ces facteurs présentent certaines difficultés qui rendent leur emploi non valide pour toutes les structures. Ceci est dû principalement au manque de données provenant des essais à échelle réelle ou réduite, et qui rendent difficiles l'extrapolation pour certains cas spécifiques.

## 2.2. Analyse statique

L'analyse statique est nécessaire pour déterminer la position d'équilibre statique du système.

### 2.2.1. Procédure de l'analyse statique

L'analyse statique consiste à déterminer séparément la rigidité de chaque élément du système dans son repère local. Puis, après avoir calculé les différentes rigidités des différents éléments, les matrices de rigidités élémentaires seront combinées dans un repère global dans une nouvelle matrice appelée matrice de rigidité globale.

Par conséquent les déplacements seront déterminés avec l'équation d'équilibre statique suivante :

$$[K]\{D\} = \{W\} \quad (3)$$

Avec

- [K] : la matrice de rigidité globale du système.
- {D} : le vecteur déplacement.
- {w} : vecteur charge due au bris de conducteur.

Cependant, la matrice de rigidité [K] varie en fonction de la déformation du système pour tenir compte des non-linéarités.

Afin de résoudre l'équation d'équilibre tenant compte du problème de non linéarité, la procédure d'analyse statique utilise une approche itérative et incrémentale : la matrice de rigidité globale [K] est recalculée à chaque itération jusqu'à ce que l'équilibre soit obtenu.

### 2.2.2. Rigidité des éléments

- Rigidité des câbles

Campbell [1970], définit la rigidité d'un câble suspendu entre deux points à élévation égale par :

$$k_w = \frac{dT}{dS} = \frac{\cosh\left(\frac{wS}{2T}\right)}{\frac{S}{T} \cosh\left(\frac{wS}{2T}\right) - \frac{2}{w} \sinh\left(\frac{wS}{2T}\right) + \frac{L_0}{AE}} \quad (4)$$

Avec :

- T : composante horizontale de la tension du câble.
- S : portée du câble.
- A : section du câble.
- E : module élastique.
- W : poids linéique.
- $L_0$  : longueur à vide du câble, i.e. longueur du câble qui relie deux supports adjacents avant l'application du chargement.

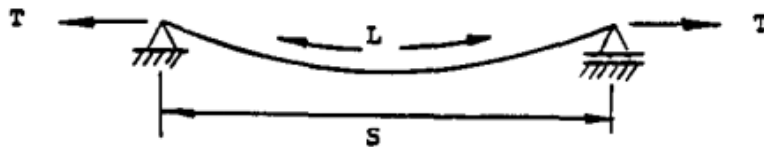


Figure 17-Configuration d'un câble à égale élévation [Campbell, 1970]

Une autre approche suppose que le câble peut être représenté par une tension équivalente droite avec un module d'élasticité équivalent. Le module élastique équivalent est donné par :

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{(wS)^2 AE}{12T^3}} \quad (5)$$

En utilisant le module équivalent, la rigidité du câble devient :

$$k_w = \frac{AE_{eq}}{S} \quad (6)$$

La matrice de rigidité du câble s'écrit comme suit :

$$[K]_w = k_w \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

- Rigidité des chaînes de suspension

Pour développer une expression de la rigidité d'un isolateur, dans la direction longitudinale de la ligne, examinons un isolateur de longueur  $I$  et de poids  $W$ , qui supporte une charge verticale  $W$  à son extrémité, et résiste à une force  $F_i$  horizontale agissant le long du câble comme indiqué à la figure 18.

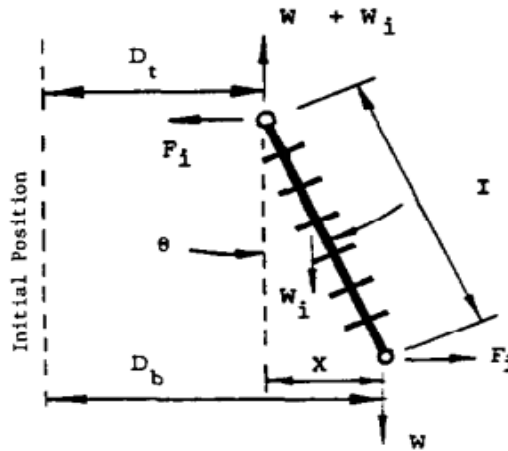


Figure 18- Forces dans l'isolateur [Siddiqui and Flemming, 1983]

En raison de cette force, la chaîne de suspension se met à balancer autour d'un angle  $\theta$ . Une expression de  $F_i$  peut être prise comme la somme des moments par rapport à la partie supérieure de l'isolateur.

En négligeant toute déformation axiale dans l'isolateur, la raideur de l'isolateur est donnée par Siddiqui et Flemming [1983] comme :

$$k_i = \frac{dF_i}{dX} = \frac{dF_i}{d\theta} \frac{d\theta}{dX} = (W + 0.5W_i) \frac{\sec^3 \theta}{I} \quad (8)$$

Cependant, cette expression de la rigidité de l'isolateur de suspension ne tient pas compte ni de la déformation axiale ni du balancement des chaînes d'isolateurs. Pour cela une autre expression mettant en œuvre ces deux derniers paramètres a été développée par Siddiqui et Flemming [1983].

$$k_i = \frac{(W + 0.5W_i)}{I \cos^3 \theta + I \sin^3 \theta \left( \frac{W + 0.5W_i}{AE} \right) (3 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)} \quad (9)$$

Avec :

- $A$  : section du câble.
- $E$  : module élastique du matériau des isolateurs.
- Rigidité du support

La raideur du support peut être décrite par une matrice de rigidité avec des degrés de liberté correspondant aux déplacements longitudinaux de chaque point de masse de la structure. S'il existe  $n$  degrés de liberté, la taille de la matrice de rigidité correspondante sera d'ordre  $n \times n$ . Le terme  $k_{ij}$  de la matrice de rigidité représente la force longitudinale au point  $i$  nécessaire pour produire une translation longitudinale unitaire.

### 2.3. Analyse dynamique

L'équation de mouvement d'une section de ligne soumise à un bris de câble est similaire à celle du problème de vibrations libres. Initialement la ligne est soumise aux efforts de tensions internes des câbles et aux charges permanentes. À la rupture soudaine d'un câble se produit une accélération nulle au point de bris ramenant le problème dynamique à un problème aux conditions initiales.

L'équation générale de mouvement, à chaque instant  $t$  s'écrit:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P(t)\} \quad (10)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} [M]: \text{Matrice de masse.} \\ [C]: \text{Matrice d'amortissement.} \\ [K]: \text{Matrice de rigidité.} \\ \{\ddot{U}\}: \text{Vecteur accélération.} \\ \{\dot{U}\}: \text{Vecteur vitesse.} \\ \{U\}: \text{Vecteur déplacement.} \\ \{P(t)\}: \text{Force excitatrice.} \end{array} \right.$$

Le problème majeur réside dans la quantification des forces dissipatives du système. Par conséquent, la détermination de la matrice d'amortissement est complexe vu qu'un canton de ligne possède plusieurs types d'éléments structuraux.

Pour cette raison, les études antérieures utilisaient des pourcentages d'amortissement. Par exemple, McClure et Lapointe [2003] supposaient 0% d'amortissement critique pour les pylônes à treillis, Yasui *et al* [1999] 1%, Siddiqui et Flemming [1984] 2% et Batista *et al* [2003] 3%.

Généralement, les principales sources d'amortissement lors d'un bris de câbles sont l'amortissement interne des câbles et l'amortissement structural des supports. Ces amortissements restent très faibles.

#### 2.4. Solution de l'équation différentielle du mouvement

La résolution de l'équation différentielle du mouvement (10) est très complexe vu que la matrice de rigidité  $[K]$  change d'une manière continue avec les déplacements qui sont en rapport direct avec la non-linéarité du système. Par conséquent, des approches numériques devront être employées de façon itérative et incrémentale afin de déterminer la matrice de rigidité  $[K]$ , à chaque instant  $t$ .

L'analyse dynamique non linéaire est donc assimilée à une analyse linéaire par segment.

L'équation différentielle du mouvement s'écrit par conséquent :

$$[M]\{\Delta\ddot{U}\} + [C]\{\Delta\dot{U}\} + [K]\{\Delta U\} = \{0\} \quad (11)$$

Avec,  $\{\Delta\ddot{U}\}$ ,  $\{\Delta\dot{U}\}$  et  $\{\Delta U\}$  sont respectivement les incréments d'accélération, de vitesse et de déplacement aux points de masse à chaque incrément de temps  $\Delta t$ .

### 3. Approche numérique

La modélisation numérique a connu un essor considérable principalement grâce à l'évolution des outils informatiques, à la capacité de calcul des ordinateurs et à l'amélioration des modèles et des codes.

McClure et Tinawi [1989] ont réussi à modéliser et valider numériquement à l'aide du logiciel de calcul et de simulation par éléments finis ADINA (ADINA Engineering 1984) les résultats expérimentaux entrepris par Mozer [1978] et Mozer *et al* [1981] pour le compte de l'EPRI.

Peabody [2004] a évalué la contribution de l'ajout de ressorts et d'amortisseurs aux pylônes pour le contrôle des forces dynamiques qui provoquent les cascades en utilisant des modèles numériques d'analyse dynamique par éléments finis (ADINA 2003) pour un cas type d'une ligne à 230 kV.

Bérubé [2011], a pu aussi grâce au logiciel de calcul par élément fini Code\_Aster développé par EDF (Électricité de France) à reproduire les résultats des essais de Mozer [1978] et à valider son modèle avec ses propres essais.

#### 3.1. Algorithme non linéaire dynamique sous Code\_Aster

Le logiciel de calcul par éléments finis Code\_Aster comprend l'opérateur DYNA\_NON\_LINE pour l'analyse dynamique non linéaire des structures par une intégration directe dans le domaine temporel. La syntaxe de cette commande est très semblable à celle de l'opérateur STAT\_NON\_LINE (statique non linéaire). Les non-linéarités traduites qu'il prend en considération sont liées au comportement du matériau, aux liaisons, ou de grandes transformations géométriques (grand déplacement et grandes rotations).

L'opérateur DYNA\_NON\_LINE sous Code\_Aster dispose de 5 schémas en temps implicites complémentaires et efficaces : la famille de Newmark, l'accélération moyenne modifiée, le schéma HHT complet, le schéma- $\theta$  et le schéma de Krenk.

Code\_Aster propose aussi 2 schémas explicites : les différences centrées et le schéma dissipatif de Tchamwa-Wielgoz.

### 3.2.Problèmes numériques associés à la modélisation mathématique

L'étude de la réponse des systèmes dynamiques non linéaires à plusieurs degrés de liberté est très compliquée. Le recours à l'étude par simulation de modèles mathématiques par méthode d'éléments finis présente un moyen efficace pour évaluer la réponse d'une ligne.

Il existe plusieurs méthodes numériques de résolution répondant à la problématique de non-linéarité géométrique d'un canton de ligne soumis à un bris de câble. Les plus populaires sont : la méthode Newmark- $\beta$  avec la règle trapézoïdale ( $\gamma=1/2$  et  $\beta=1/4$ ), la méthode Wilson- $\theta$  (avec  $\theta=1,4$ ), la méthode d'accélération moyenne, et la méthode  $\alpha$ .

Le principe de calcul pour les différentes méthodes précédemment énumérées est globalement semblable. Il s'agit toutefois de calculer les déplacements, les vitesses et les accélérations en fonction des déplacements calculés à l'itération précédente.

On présentera par la suite un bref aperçu des méthodes d'intégration Newmark- $\beta$ , HHT- $\alpha$  et Wilson- $\theta$ .

#### 3.2.1. Méthode d'intégration de Newmark- $\beta$ :

Cette méthode a été proposée par Newmark [1959]. Elle permet la résolution numérique des équations différentielles de second ordre linéaires et non linéaires.

La méthode repose sur deux paramètres fondamentaux  $\gamma$  et  $\beta$ , permettant d'influencer à la fois la précision et la stabilité de la méthode. Ces paramètres font varier l'importance de l'accélération à la fin de l'incrément d'intégration temporel  $\Delta t$  dans le calcul des vitesses et des déplacements nodaux à travers les équations :

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + \{(1 - \gamma)\ddot{U}_t + \gamma\ddot{U}_{t+\Delta t}\}\Delta t \quad (12)$$

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \dot{U}_t\Delta t \left\{ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{U}_t + \beta\ddot{U}_{t+\Delta t} \right\} (\Delta t)^2 \quad (13)$$

Le tableau 3 illustre l'influence du paramètre  $\gamma$  sur la précision de l'opérateur comme suit :

Tableau 3- Influence du paramètre  $\gamma$  sur la stabilité de l'opérateur

Domaine	Stabilité
$\gamma \leq 1/2$	Instable
$1/2 \leq \gamma$ et $2\beta \leq \gamma$	Conditionnellement stable
$1/2 \leq \gamma$ et $\gamma \leq 2\beta$	Inconditionnellement stable

En plus du paramètre  $\gamma$ , la précision est aussi influencée par un autre paramètre de stabilité  $\beta$ . En effet Newmark recommande l'utilisation de ( $\gamma=0,5$ ) pour un maximum de précision et un amortissement numérique nul (appelé aussi amortissement algorithmique). Cependant, il reste toujours une imprécision à l'échelle de temps.

Par conséquent pour ( $\gamma=0,5$ ), l'équation (12) devient :

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + (1/2)\{\ddot{U}_t + \ddot{U}_{t+\Delta t}\}\Delta t \quad (14)$$

Ce qui revient à considérer l'accélération le long de cet intervalle de temps comme constante. Toutefois il est recommandé d'itérer à chaque incrément de temps afin de s'assurer que l'équilibre est satisfait.

- Critères de convergences et de stabilité de la méthode de Newmark- $\beta$  des systèmes linéaires :

Le taux de convergence  $\rho$  est défini comme le rapport entre l'erreur sur les accélérations dérivées et l'erreur sur les accélérations supposées. Il dépend de la fréquence du mode de vibration le plus élevé du système, McClure et Tinawi [1988].

$$\rho = -\beta w_n^2 (\Delta t)^2 \quad (15)$$

Où  $W_n$  est la pulsation propre du mode le plus élevé du système.

Le critère de convergence est traduit par :

$$|\rho| \leq 1 \quad (16)$$

Par ailleurs, il s'en suit :

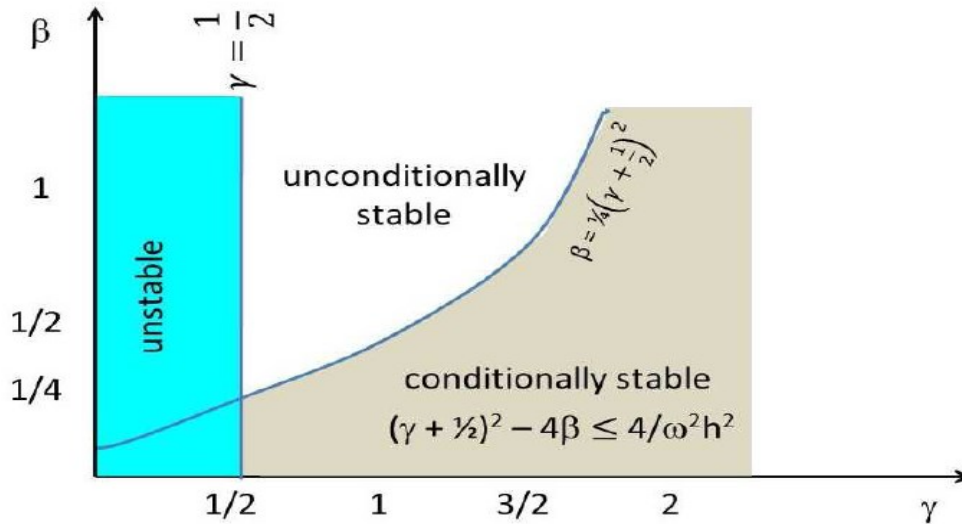
$$\frac{\Delta t}{T_n} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\beta}} \quad (17)$$

Newmark a aussi démontré que le système est d'autant plus stable pour un  $\Delta t$  choisi comme suit :

$$\frac{\Delta t}{T_n} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{1-4\beta}} \quad (18)$$

Tableau 4 - Influence du paramètre  $\beta$  sur la stabilité de l'opérateur

Domaine	Stabilité
$\beta \leq 1/8$ et $ \rho  \leq 1$ (y'a convergence)	L'algorithme est toujours stable.
$\beta > 1/8$	La convergence ne garantit en aucun cas la stabilité de l'algorithme.
$\beta = 1/4$	Inconditionnellement stable.

Figure 19-Schéma de stabilité Newmark- $\beta$  [M. Geradin and D. Rixen]

La méthode Newmark- $\beta$  est inconditionnellement stable pour  $\gamma=1/2$  et  $\beta=1/4$ .

### 3.2.2. Méthode HHT- $\alpha$

La méthode a été proposée par Hilber, Hughes et Taylor. Son emploi permet d'atténuer les hautes fréquences qui engendrent des instabilités numériques et reproduire le mieux possible les basses fréquences. Cette méthode est connue également sous le nom de la méthode  $\alpha$  et c'est ainsi que le



schéma d'intégration est appelé HHT- $\alpha$ . Elle repose sur la méthode de Newmark où les paramètres  $\gamma$  et  $\beta$  sont définis en fonction du paramètre  $\alpha$  comme suit :

$$\gamma = \frac{1}{2}(1-2\alpha) \quad (19)$$

$$\beta = \frac{1}{4}(1-\alpha)^2 \quad (20)$$

Le paramètre  $\alpha$  varie entre  $[-1/3, 0]$ . Pour  $\alpha=0$  la méthode correspond à la méthode de Newmark, alors que pour  $\alpha$  dans  $[-1/3, 0]$  la méthode devient inconditionnellement stable et tient compte des phénomènes de second ordre.

### 3.2.3. Méthode d'intégration de Wilson- $\theta$

La méthode a été proposée par Wilson, Farhoomand et Bathe [1973]. Elle est utilisée pour résoudre les équations de mouvements non couplées en considérant les équations d'équilibre suivantes du système à l' instant  $(t+\theta\Delta t)$  :

$$M\Delta\ddot{U}_t + C\Delta\dot{U}_t + K\Delta U_t = \bar{R}_{t+\theta\Delta t} - M\ddot{U}_t - C\dot{U}_t - F_t^e \quad (21)$$

Avec :

$$- \bar{R}_{t+\theta\Delta t} = R_t + \theta(R_{t+\Delta t} - R_t) \quad (22)$$

$$- \Delta\ddot{U}_t = \ddot{U}_{t+\theta\Delta t} - \ddot{U}_t \quad (23)$$

$$- \Delta\dot{U}_t = \dot{U}_{t+\theta\Delta t} - \dot{U}_t \quad (24)$$

$$- \Delta U_t = U_{t+\theta\Delta t} - U_t \quad (25)$$

Tout comme les paramètres  $\beta$  et  $\gamma$ , la valeur de  $\theta$  contrôle la stabilité numérique de l'algorithme d'intégration.

Tableau 5 - Influence du paramètre  $\vartheta$  sur la stabilité de l'opérateur [McClure et Tinawi, 1988]

Domaine	Stabilité
$\theta = 1$	La solution est semblable à la méthode d'accélération linéaire de Newmark.
$\theta \geq 1,37$	Inconditionnellement stable.

La méthode postule une variation linéaire de l'accélération au cours de l'intervalle de temps  $[t, t+\theta\Delta t]$  pour  $\theta \geq 1$ .

L'état du système étant connu à l'instant  $t$ , on calcule la réponse à l'instant  $(t+\theta\Delta t)$  qui servira par la suite à la détermination des vectrices vitesses à l'instant  $(t+\Delta t)$  tout en considérant une variation linéaire de l'accélération.

#### 4. Confinement des ruines

Plusieurs philosophies de conception et dispositifs pour le confinement des ruines ont été développés au cours de l'histoire des lignes de transport. Ces tentatives qui ont débuté au début du dernier siècle [Wilkinson, 1910], et qui continuent jusqu'à présent permettent de limiter l'étendue et réduire les incidences des cascades.

##### 4.1. Insertion de pylône compétent

Cette technique consiste à intervenir directement sur les pylônes par insertion de pylônes suffisamment résistants afin de restreindre les cascades sur un nombre de pylônes. En outre, BPA a mis au point une philosophie qui contrôle le confinement des ruines et qui consiste à utiliser deux différentes structures sur une même ligne : des structures lourdes qui peuvent résister à la totalité de la charge longitudinale d'impact et des structures légères qui peuvent résister à une partie du chargement longitudinal d'impact.

La conception des pylônes compétents a été basée sur l'utilisation d'un facteur d'impact qui est définie comme le ratio entre la valeur de la composante horizontale de la charge dynamique et la tension horizontale initiale du conducteur dont les charges dues au vent et à la neige sans nuelles et la température ambiante est de 30 Fahrenheit, [Kempner, 1997]. Le facteur d'impact utilisé par BPA est de 1,33.

La philosophie décrite par BPA consiste à ce que l'endommagement d'un pylône léger suite à un impact longitudinal permet de réduire le facteur d'impact de 50 % sur le pylône suivant et ainsi de suite.

##### 4.2. Console fusible

Une autre méthode consiste à modifier une séquence du pylône afin de concentrer les efforts sur cette partie et réduire les efforts transmis au canton.

Les modifications faites auparavant ont été apportées à la console (console fusible, figure 20) en lui permettant par conséquent de se rabattre lors des efforts engendrés suite à un bris de conducteur.

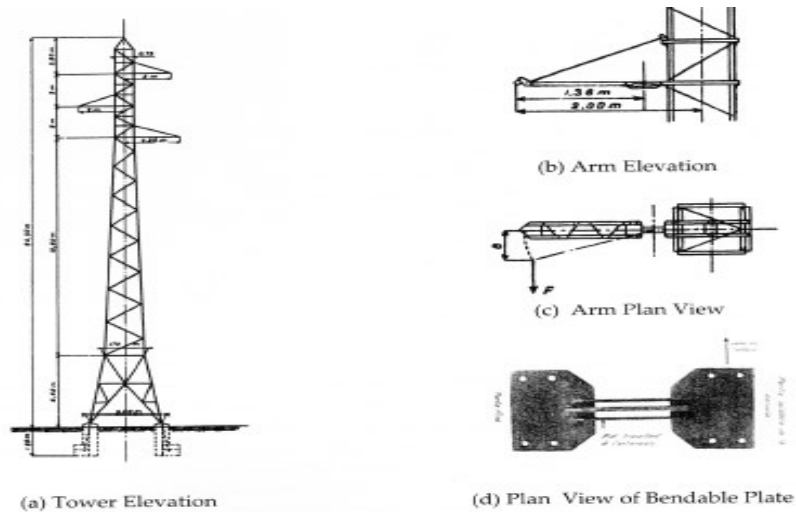


Figure 20-Console fusible [Chappé et al, 1948]

#### 4.3. Console avec fusible ductile

Il s'agit d'insérer un mécanisme ayant un comportement ductile. Ceci a pour objectif d'augmenter considérablement l'amortissement lors d'un bris de conducteurs.

Bérubé [2011] a effectué des essais expérimentaux sur ce genre de mécanisme afin d'évaluer l'effet de l'ajout d'un mécanisme de ruine ductile dans la réponse dynamique des structures de ligne électrique. Puis il a réussi à modéliser le comportement de sa structure munie de consoles ductiles à l'aide du logiciel Code\_Aster.

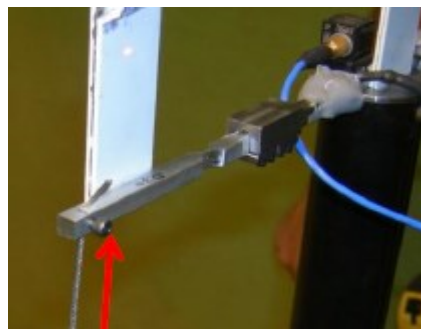


Figure 21-Console avec fusible ductile [Bérubé, 2011]

#### 4.4. Pince de glissement

Miller [1932] a breveté une pince destinée à libérer les efforts produits le long du conducteur lors d'un bris par glissement du conducteur.

Une fois la charge limite atteinte, la pince libère la partie de retenue du conducteur pour former un anneau avec suffisamment d'espace permettant au conducteur de glisser librement à travers la pince jusqu'à rétablissement de l'équilibre.

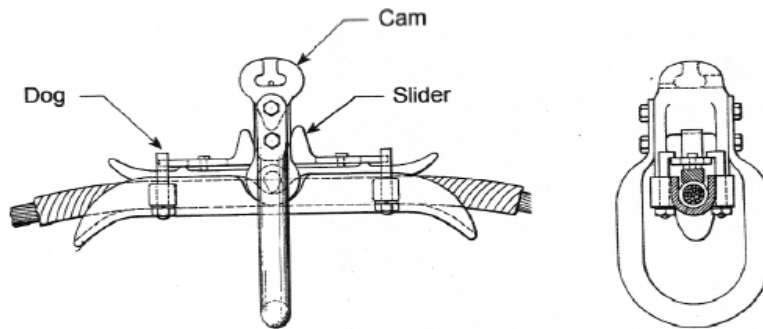


Figure 22-Pince fusible [Miller, 1932]

#### 4.5.Mécanisme de libération de la chaîne d'isolateur

Fleming [1933] a breveté un système de déblocage de la chaîne d'isolateurs.

La chaîne d'isolateurs est suspendue à un crochet connecté à un canal incurvé. Le crochet possède également une attache reliée au corps de la tour. Le crochet est destiné à rester centré dans le canal sous charges verticales et transversales, alors qu'il est destiné à glisser sur le canal sous une charge longitudinale. Cela permet de réduire la tension résiduelle statique et également la torsion de la tour. Cependant, l'inconvénient de cette conception se manifeste lorsque la chaîne est remplie de glace, ce qui empêche éventuellement le bon fonctionnement du mécanisme.

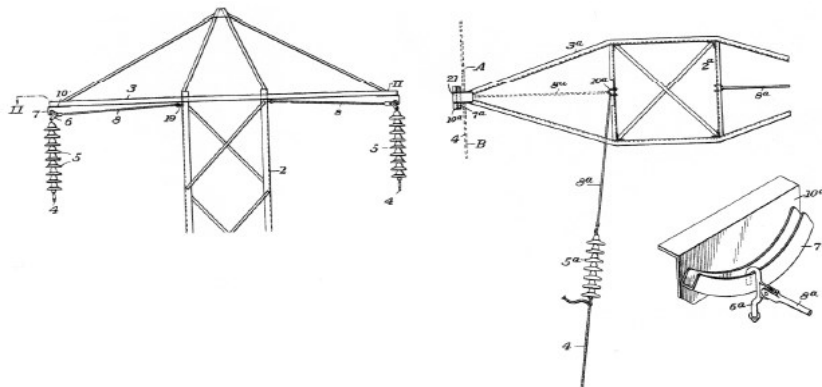


Figure 23-Mécanisme de libération de la chaîne d'isolateur [Fleming, 1933]

Le mécanisme de Milow [1964] consiste à libérer la chaîne d'isolateur sous charges longitudinales. L'importance de ce mécanisme est liée à la pièce numéro (16) (figure 24). Elle est conçue de façon

à pouvoir coulisser et sortir de son logement lors d'un chargement longitudinal ultime afin de libérer la chaîne d'isolateur.

Ce mécanisme peu complexe permet d'amortir considérablement l'effet transitoire de la charge dynamique produite lors d'un bris de câble par diminution de la tension contre une augmentation de la portée du conducteur.

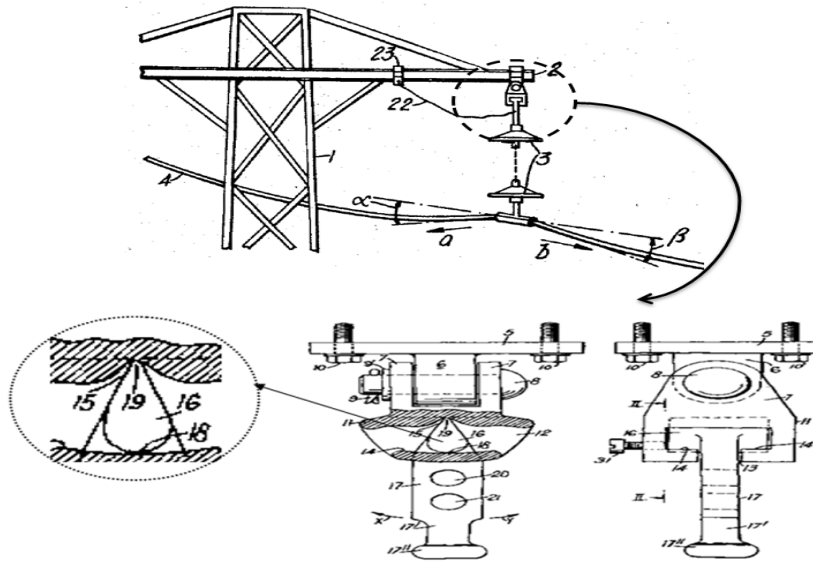


Figure 24-Mécanisme de libération de la chaîne d'isolateur [Milow, 1964]

Un autre dispositif de confinement de ruine breveté par Ibanez et Merz [1988] et testé par l'Electric Power Research Institute (EPRI) à Haslet, Texas est présenté à la figure 25. Ce mécanisme a pour objectif de limiter le chargement longitudinal grâce à sa géométrie spirale formée par deux plaques planes liées entre elles à une extrémité. L'une des deux autres extrémités est liée à la pince de suspension et l'autre à l'extrémité de la chaîne d'isolateur.

La rigidité de cette spirale est réglée en fonction de la tension initiale des câbles. Une fois un chargement longitudinal dépasse la rigidité de la spirale, elle entraîne cette dernière à se détendre et équilibrer cet effort par déformation de la spirale.

L'essai a montré une réduction de la tension de la chaîne d'isolateur de 66 kN (sans dispositif) à 30 kN (avec dispositif).

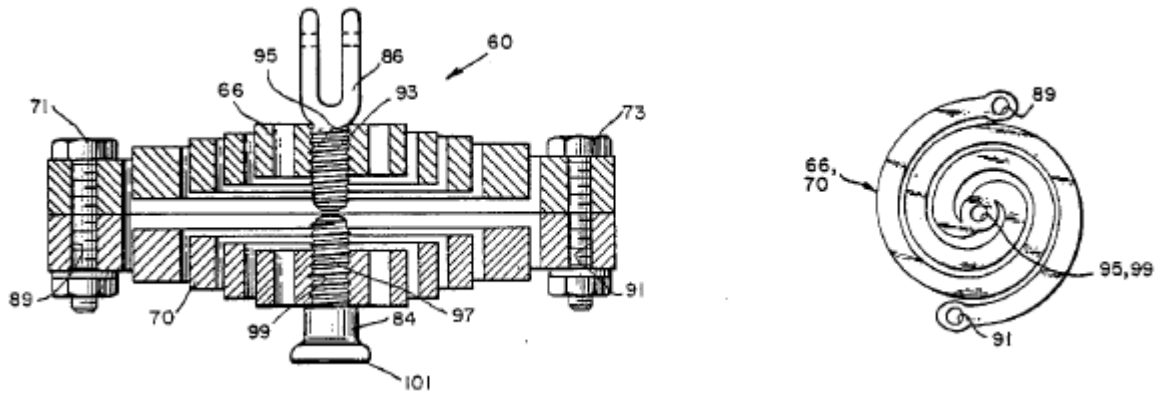


Figure 25-Mécanisme d'absorption d'énergie [Ibanez et Merz, 1988]

# CHAPITRE III. DÉFINITION DU PROJET DE RECHERCHE

Les lignes de transport d'énergie électrique s'étendent sur des milliers de kilomètres au Canada. Elles sont toutefois confrontées à des défis à long et court termes tels que le vieillissement du réseau de transport, la demande croissante des consommateurs ainsi que la pression du public pour la conception des lignes dépourvues de nuisances visuelles et environnementales. D'autre part, le confinement des ruines lors d'événements ayant peu de probabilité d'occurrence est un défi en ouvrages neufs et existants.

Plusieurs recherches jusqu'à présent ont étudié les façons de limiter l'impact et diminuer le risque d'affecter trop de pylônes. En pratique, les lignes de transport ne sont pas souvent conçues pour supporter toutes les surcharges dynamiques pouvant avoir lieu. Il est toléré de perdre une ou plus de structures voisines suite à un bris de conducteur à condition que le phénomène ne se propage pas à trop de pylônes. Cependant, peu d'informations sont disponibles pour les concepteurs pour prédire le nombre de pylônes affectés par une ruine en cascade en fonction des charges considérés pour la conception des supports.

L'objectif global de cette étude consiste à étudier numériquement la contribution de ces événements dynamiques susceptibles d'avoir lieu sur un canton de ligne afin de prédire le nombre de pylônes pouvant être affectés lors d'un bris de câble en fonction des surcharges critiques de conception. En particulier, l'étude contribuera à relier le nombre de pylônes affectés à la capacité des pylônes pour permettre aux concepteurs de prendre des décisions rationnelles sur les charges longitudinales à considérer en fonction de ce qui est jugé acceptable comme étendue d'une cascade en cas de bris de conducteur.

À cet effet le projet de recherche se divise en deux grandes parties. La première partie étant une étape de validation numérique. Cette partie a été effectuée en deux phases :

- 1) La modélisation de l'essai E20 de Mozer.
- 2) La validation de poutre multifibre avec une modélisation en POU\_D\_TGM sur un cas de référence.

La seconde partie était de modéliser un canton de ligne avec des paramètres réels formés de 16 pylônes tangents et deux pylônes d'arrêts. Cette étude se limite à un seul type de pylônes soit les pylônes tubulaires monopodes. L'étude repose essentiellement sur 5 paramètres.

Le premier paramètre est la capacité des pylônes de la ligne. Il s'agit d'effectuer les différentes analyses pour des capacités de pylônes allant de 10 à 90% de la capacité du pylône de référence. La capacité du pylône de référence correspond au cas où le pylône atteint tout juste la limite de contrainte de 345 MPa lors du bris des câbles. De plus, le critère de flambement local doit être vérifié afin de s'assurer qu'il n'a pas d'incidence sur la ruine du pylône.

Le deuxième paramètre tient compte de la loi de comportement assignée au matériau des pylônes. Le comportement élastique, élastique parfaitement plastique et élasto plastique bilinéaire seront étudiés.

Le troisième paramètre correspond à la tension des câbles. Il s'agit d'appliquer des tensions de 25, 30, 40, 50 et 60 fois la limite élastique du câble.

Le quatrième et cinquième paramètre consiste respectivement à varier la longueur des portées et celle des chaînes d'isolateur. Les longueurs étudiées sont résumé au tableau 6.

*Tableau 6- Longueur des portées et de la chaîne d'isolateur*

Portée (m)	Isolateur (m)
152,4	0
304,8	2,1336
457,2	4,2672



## CHAPITRE IV. VALIDATION PRÉLIMINAIRE

La validation consiste à mettre en place les différents paramètres de modélisation qui serviront comme référence pour la modélisation du présent projet.

### 1. Validation de l'essai E20 de Mozer

Mozer a effectué en 1978 pour le compte de l'EPRI, une série d'essais de bris sur une ligne à échelle réduite (1:30). Son modèle comprenait deux supports avec une portée de 9,75 mètres, deux chaînes d'isolateurs, un câble conducteur et un câble de garde. Les détails du modèle étudié par Mozer et faisant l'objet de notre validation sont présentés à la figure suivante :

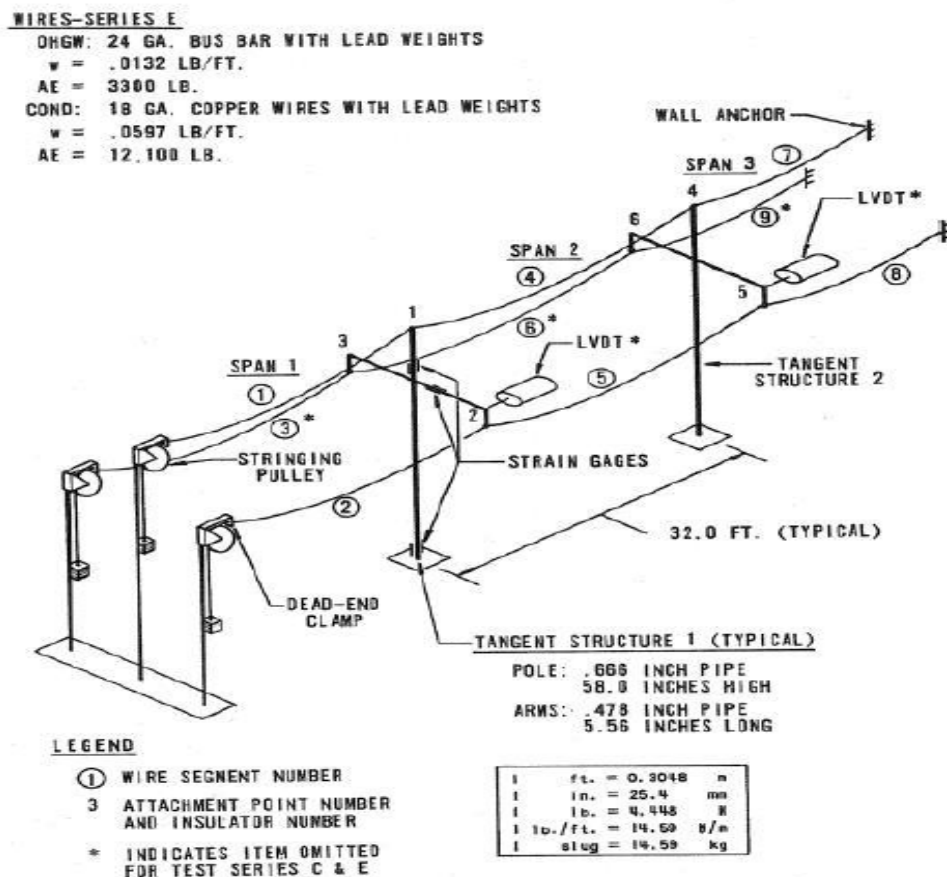


Figure 26-Banc d'essais [Mozer, 1978]

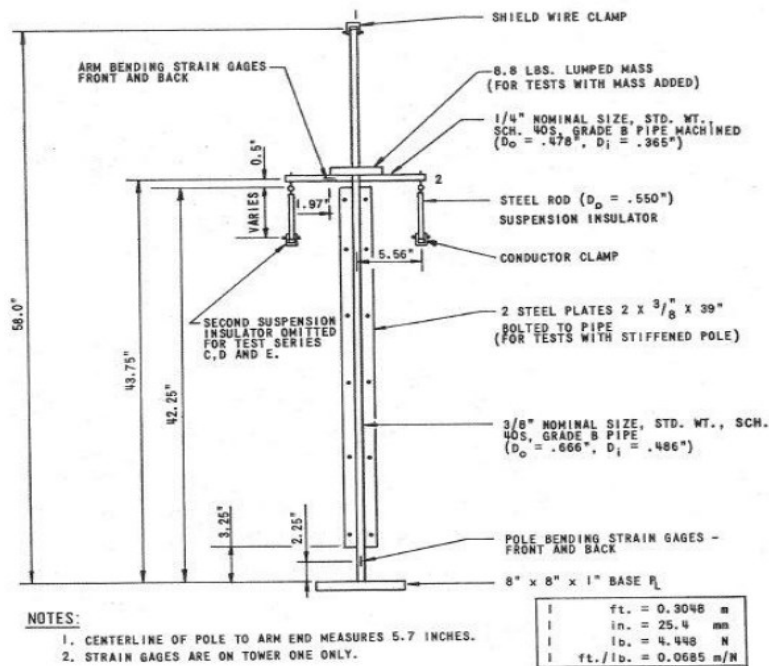


Figure 27-Détails des supports du canton de [Mozer, 1978]

La validation a été faite pour le cas E20 de la série d'étude de Mozer. Ce cas a été choisi vu sa simplicité : d'une part du fait que le canton comprend un seul câble conducteur et un seul câble de garde et d'autre part vu que cet essai a été déjà validé par une approche numérique établie une fois par McClure et Tinawi [1989] avec le logiciel de calcul par éléments finis ADINA et une deuxième fois par Bérubé [2011] avec le logiciel de calcul par éléments finis Code\_Aster.

On va s'intéresser le long de cette section à valider le modèle selon les données et les paramètres disponibles des travaux de Mozer. Les efforts de cisaillement dans la console et les moments à la base du premier pylône adjacent au point de bris feront l'objectif principal de la validation du cas E20 des essais de Mozer.

### 1.1. Caractéristiques de la modélisation et du maillage

Le tableau 7 résume les différents paramètres d'entrée liés à la modélisation du cas E20 de Mozer [1978].

Tableau 7-Paramètres d'entrée sous Code\_Aster

Isolateur		Câble de garde		Câble conducteur	
Aire (mm <sup>2</sup> )	153,28	Aire (mm <sup>2</sup> )	0,20508	Aire (mm <sup>2</sup> )	0,82355
E (N/m <sup>2</sup> )	2 <sup>E</sup> 11	E (N/m <sup>2</sup> )	71751,1E6	E (N/m <sup>2</sup> )	65516,1 <sup>E</sup> 6
NU	0,27	NU	0,27	NU	0,27
Rho (kg/m <sup>3</sup> )	7850	Rho (kg/ m <sup>3</sup> )	95985,3	Rho (kg/ m <sup>3</sup> )	108105
ALPHA (10 <sup>E</sup> - 6/°C)	1	ALPHA (10 <sup>E</sup> - 6/°C)	16,6	ALPHA (10 <sup>E</sup> - 6/°C)	16,6
Longueur (mm)	114	Tension (N)	6,58	Tension (N)	68,06

Les pylônes et les consoles ont été modélisés avec la formulation d'éléments de poutres de Timoshenko prenant en compte les grands déplacements et les grandes rotations. Les câbles et les isolateurs ont été modélisés par des éléments de type CABLE. La maille support est de type SEG2 qui correspond à des segments à deux nœuds. Une routine python développé par Bérubé [2011] a servi comme outil pour faire le maillage du modèle puis l'exporter sous un autre format compatible sous Code\_Aster.

Les paramètres liés au maillage sont présentés à la figure suivante :

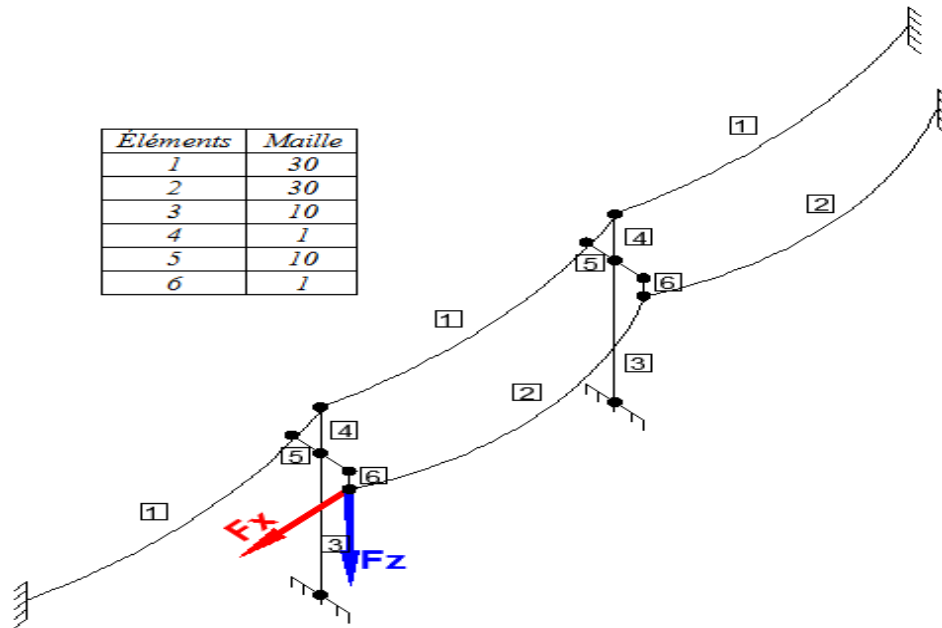


Figure 28-Caractéristiques du maillage

L'étude comprend deux calculs en non linéaire. Le premier est une étude statique qui s'étale sur étapes pour appliquer le chargement graduellement. L'étude consiste à la mise en flèche du câble conducteur et du câble de garde sous l'effet de leur propres poids.

Les efforts dans la portée où se produit le bris ont été remplacés par une force statique équivalente positionnée au point de rupture qui est dans cette étude l'extrémité inférieure de l'isolateur.

- $F_x$  = Tension dans le câble conducteur.
- $F_z$  = Poids propre d'une demi-portée du câble conducteur.

Les câbles sont modélisés initialement avec des lignes droites. Une routine python a été développée pour faciliter le calcul des réglages des câbles initialement définis avec des lignes droites. La routine consiste en la recherche d'une valeur cible à travers l'équilibre interne-externe du câble. La valeur cible recherchée est un gradient de température fictif qui tient compte des paramètres mécaniques et géométriques du câble. Il permet par conséquent de faciliter la mise en flèche du câble sous le logiciel de calcul en élément fini Code\_Aster à travers l'affectation d'un champ de température au conducteur.

Le second calcul est un calcul en dynamique non linéaire. Ce calcul prend en considération l'effet du bris du câble qui survient dès l'achèvement de l'analyse statique. L'intervalle de calcul alloué à cette résolution est de 400 ms selon un pas de 0.1 ms afin d'être en conformité avec les études entreprises par Bérubé [2011] et McClure et Tinawi [1989]. Le calcul repose sur le schéma d'intégration temporelle HHT- $\alpha$  avec  $\alpha$  est choisie égale à -0,3 afin de remplacer l'amortissement mécanique réel par un amortissement numérique permettant également de stabiliser le calcul. En pratique la gamme de  $\alpha$  recommandée se situe entre 0 et -1/3, [Greffet, 2013]. Pour  $\alpha=0$  il n'y a

pas d'amortissement numérique, alors que pour  $\alpha$  plus petit que  $-1/3$  l'accroissement de l'erreur sur la réponse des premiers modes en fonction du pas de temps est important.

La formulation adoptée est une formulation Déplacement et le solveur est factorisation multi-frontale, [Boiteau, 2010].

## 1.2.Résultats de la modélisation et interprétations

Les courbes de la figure 29 présentent les résultats du moment obtenu à la base du pylône adjacent au point de rupture pour les essais réalisés par Mozer (essais E20), la validation numérique effectué par Bérubé et celle obtenue lors de ce projet.

Cependant la figure 30 présente les courbes des résultats de cisaillement à la console du pylône adjacent au point de rupture pour l'essai E20 de Mozer et pour la validation numérique obtenue lors de ce projet.

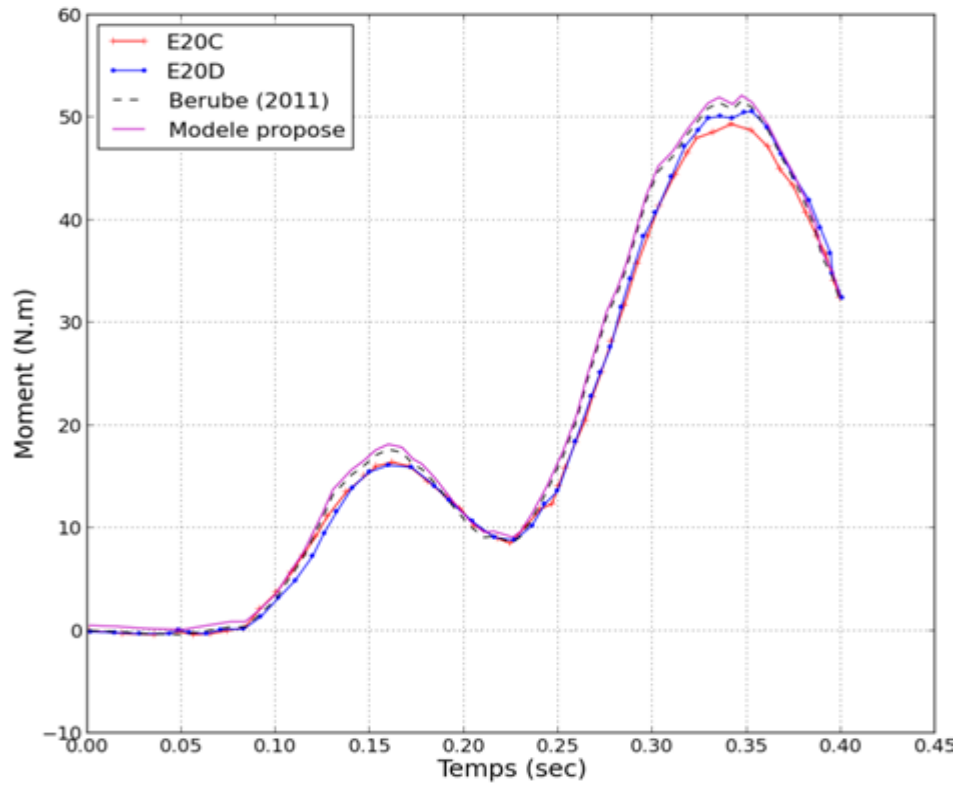


Figure 29- Moment à la base du pylône adjacent au point de bris pour l'essai E20 de MOZER

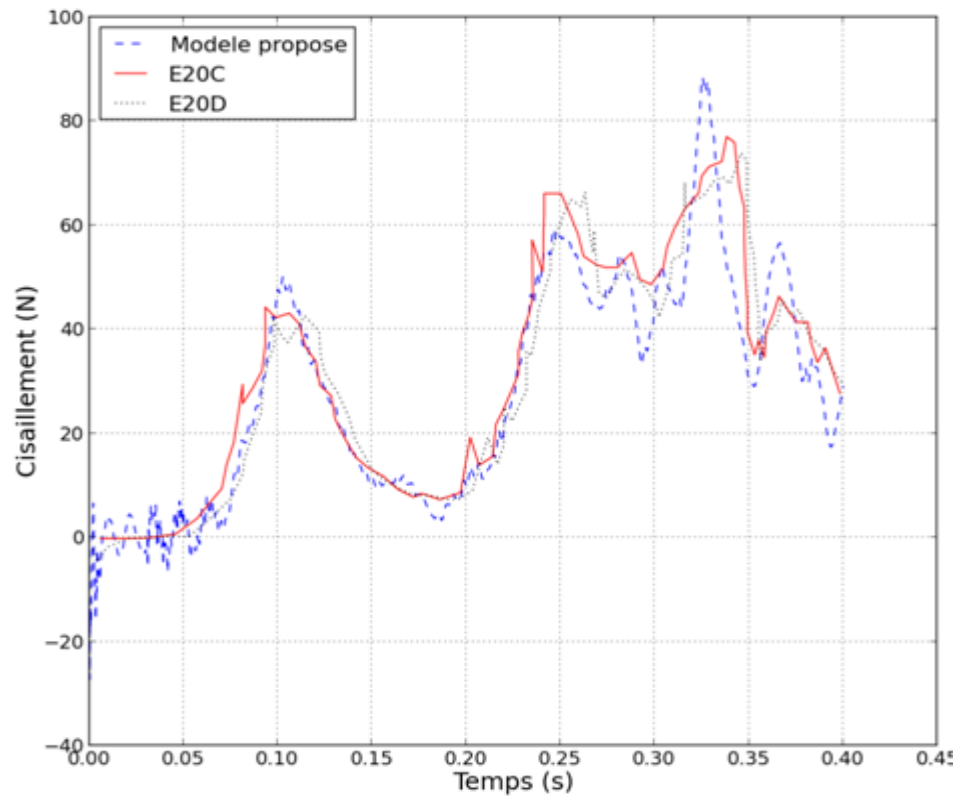


Figure 30- Cisaillement à la console du pylône adjacent au point de bris pour l'essai E20 de Mozer

Les efforts de flexions et de cisaillement obtenus respectivement à la base et à la console du pylône adjacent au point de rupture lors de la validation numérique sont très similaires à ceux obtenus par Mozer d'une part et par Bérubé d'autre part. En effet l'écart que présentent les courbes si dessus ne dépasse pas en tout temps 5%. Les différences obtenues peuvent être expliquées par la présence d'un plus grand amortissement dans les essais que dans le modèle ou encore par des imprécisions au niveau des propriétés mécaniques et géométriques du canton.

*Tableau 8- Écart entre la modélisation élastique et l'essai expérimental*

$M_{\text{max-référence}}$ (N.m)	$M_{\text{max}}$ (N.m)	% Écart (N.m)
50,59	52,15	2,99

La méthode numérique utilisée permet donc de bien reproduire le comportement d'un canton à échelle réduite soumis à un bris de câble. Cette méthode pourrait être adoptée pour réaliser l'étude paramétrique sur un canton à échelle réelle.

Une seconde validation d'une poutre en I maillée en éléments multifibres a été aussi effectuée lors de ce projet. Les détails de cette validation sont présentés à l'Annexe C.

# CHAPITRE V. MODÉLISATION D'UN CANTON DE LIGNE

## 1. Description du modèle étudié

Le canton de ligne faisant l'objet de cette étude est celui étudié par Mozer [1978] pour le compte de l'Electric Power Research Institute (EPRI). Il s'agit d'une ligne à 230 kV composée de 17 portées de 152,4 m chacune. La ligne est constituée de :

- 16 pylônes d'alignements.
- 2 pylônes d'arrêts rigides.
- 3 chaînes d'isolateurs par pylône avec 2,134 m de longueur.
- 3 câbles conducteurs 1590 kcmil 45/7 ACSR avec tension horizontale initiale de 44,48 kN.
- 1 câble de garde en acier de diamètre 13 mm avec tension horizontale initiale de 13,34 kN.

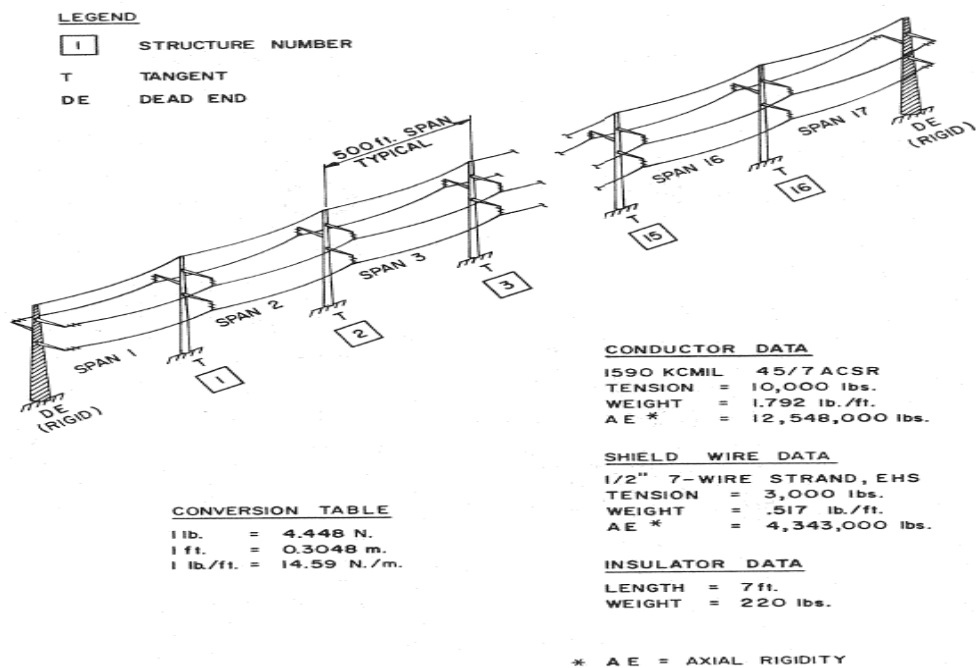


Figure 31-Canton de Mozer [Mozer, 1978]

La géométrie des pylônes et les propriétés des câbles conducteurs et de garde utilisées par Mozer sont données à la figure 31.



Les pylônes sont des tubulaires en acier à section elliptique avec une hauteur de 25,146 m. La matrice de flexibilité donnée par Mozer de chacun des pylônes est donnée à la figure 32.

$$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} \\ & F_{22} & F_{23} & F_{24} \\ & & \text{SYM.} & F_{33} & F_{34} \\ & & & & F_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .723 & .531 & .380 & .263 \\ & .499 & .282 & .238 \\ & & \text{SYM.} & .307 & .159 \\ & & & & .190 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \frac{\text{ft.}}{\text{lb.}}$$

Figure 32-Matrice de flexibilité du pylône [Mozer, 1978]

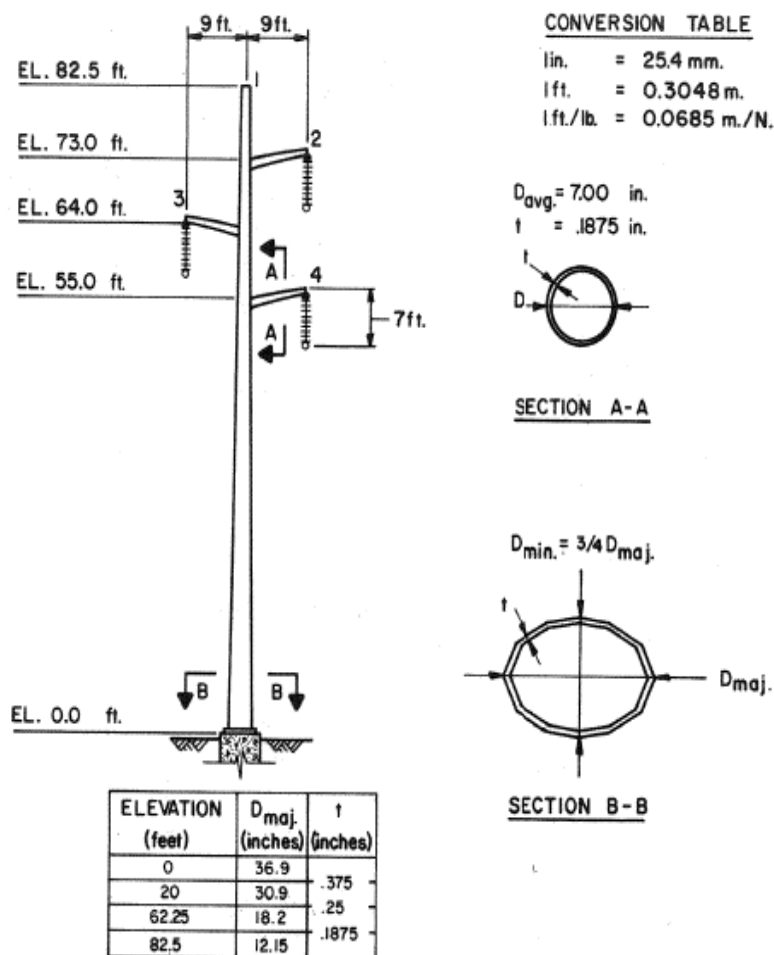


Figure 33-Caractéristiques géométriques des pylônes [Mozer, 1978]

Afin de simplifier la modélisation du problème, une section circulaire équivalente d'un diamètre constant sur toute la hauteur du pylône a été identifiée pour chaque configuration du canton étudiée.

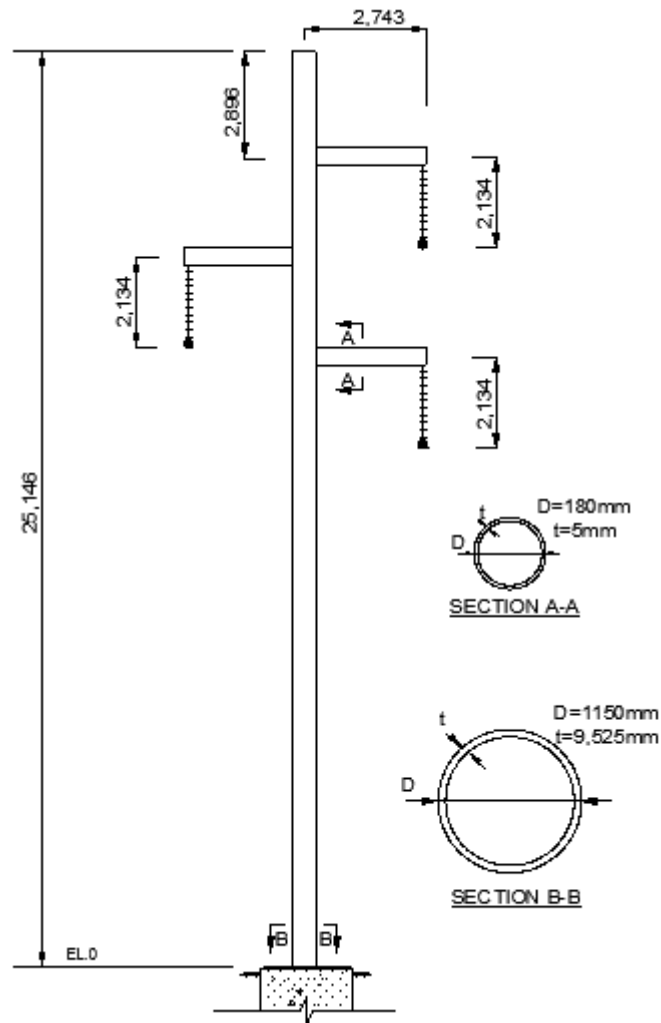
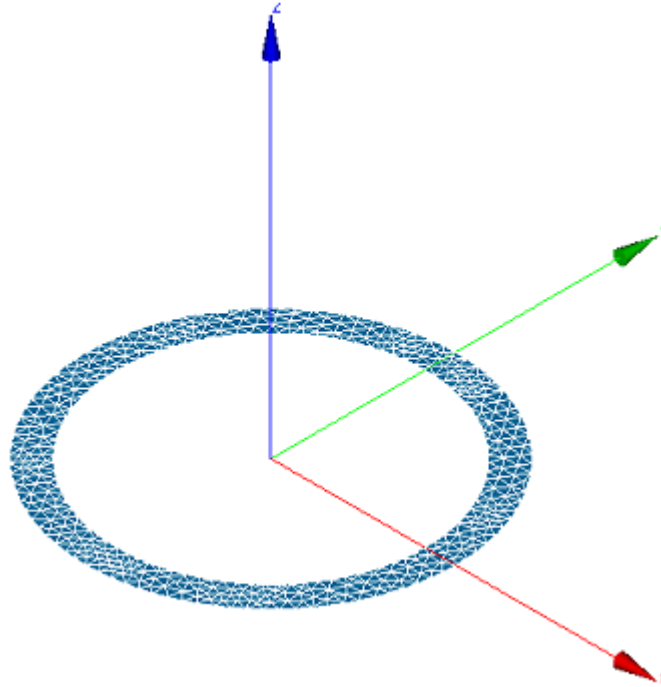


Figure 34- Caractéristiques géométriques du pylône de référence

## 2. Description de la modélisation et du maillage

Plusieurs types d'éléments ont été considérés avec Code\_Aster afin de mieux reproduire le phénomène de bris de conducteur sur la ligne. La modélisation des pylônes et des consoles a été basée sur une résolution d'un problème de poutres de Timochenko en grand-déplacement [Flejou, 2011] pour lequel chaque section d'une poutre est divisée en plusieurs fibres.

Un outil en langage Python a été créé pour faciliter la création et le maillage des sections des pylônes et des consoles.



*Figure 35-Section de pylône maillé avec éléments multifibres*

Les chaînes d'isolateurs, les câbles conducteurs et le câble de garde ont été modélisés à l'aide d'éléments de type câble en grands déplacements [Flejou, 2010], sans rigidité en flexion et siège d'un effort normal de traction vu que la rigidité axiale en compression a été choisie très faible par rapport à celle en traction.

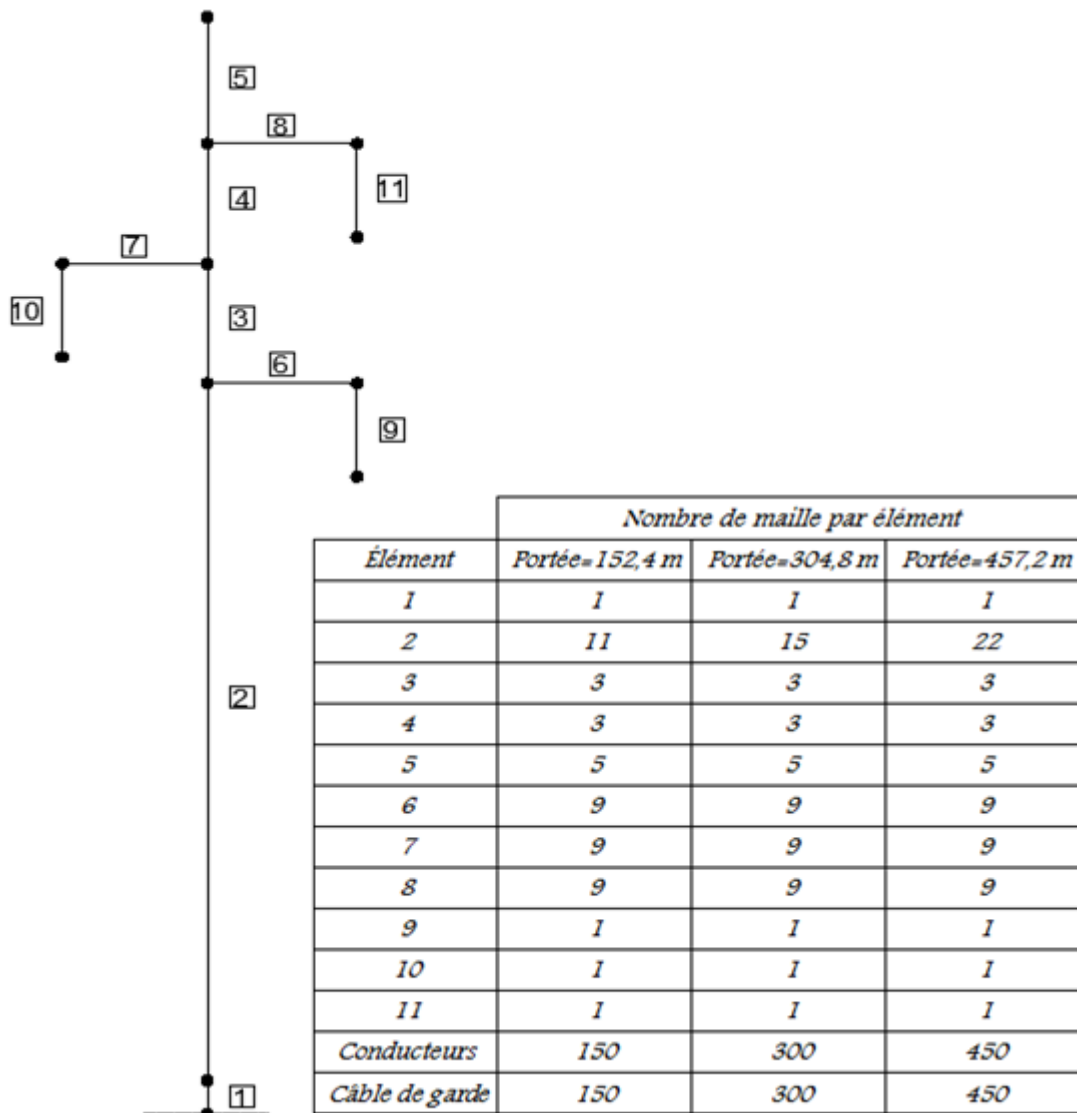


Figure 36- Caractéristiques du maillage du canton de ligne étudié

La figure 36 montre le nombre de mailles utilisés pour chaque élément du modèle. La hauteur des pylônes et donc le nombre de maille de l'élément 2 a été modifiée lorsque la longueur des portées change de façon à obtenir toujours la même hauteur de dégagement par rapport au sol pour le cas de tension initiale à nu (25% RTS).

Une analyse en statique non linéaire permet de déterminer dans un premier temps la nouvelle flèche dans les câbles conducteurs. Ensuite la différence entre la flèche du modèle de référence (Portée=152,4 mètres) et celle calculée pour les nouvelles portées (Portée=304,8 et 457,2 mètres) est ajoutée à la longueur de l'élément 2 du support. En gardant la tension horizontale constante, plus la portée est longue, plus sa flèche est significative. Par conséquent, la longueur de l'élément 2 est plus grande et le support devient plus haut.

### 3. Étapes de la modélisation

L'étude comprend sommairement deux étapes : la première étape est une étude en statique non linéaire. Il s'agit de la mise en flèche des câbles conducteurs et du câble de garde. Cette étape consiste à affecter un champ de température aux câbles. Le gradient thermique a été calculé à l'aide d'une routine Python selon l'équation ci-dessous puis entrée manuellement dans Code\_Aster.

$$g = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot \delta \cdot t \cdot \left( d + \frac{t}{1000} \right) \quad (26)$$

$g$  est le poids linéique de glace.

$\delta=900\text{kg/m}^3$  est la masse volumique de la glace.

$t$  est l'épaisseur de glace en millimètre.

$d$  est le diamètre du câble en mètre.

Les charges gravitaires dues aux poids propres de la structure et des câbles ont été aussi prises en compte lors de cette étape.

Des forces statiques équivalentes à deux composantes X et Z ont été positionnées aux points de rupture. Ces forces tiennent compte de la tension du câble dans la direction de la ligne et du poids propre des câbles dans la direction verticale. Le calcul est divisé en 10 étapes pour l'analyse statique dans lesquelles la gravité a été appliquée graduellement à l'aide d'une fonction linéaire défini sous Code\_Aster. Cependant, le gradient thermique a été appliqué à partir de la cinquième étape de calcul vue que le critère de convergence n'est pas atteint lorsque la gravité et le gradient thermique sont introduits simultanément. La figure 37 montre une image de poste traitement sous Code\_Aster de l'équilibre statique des câbles.

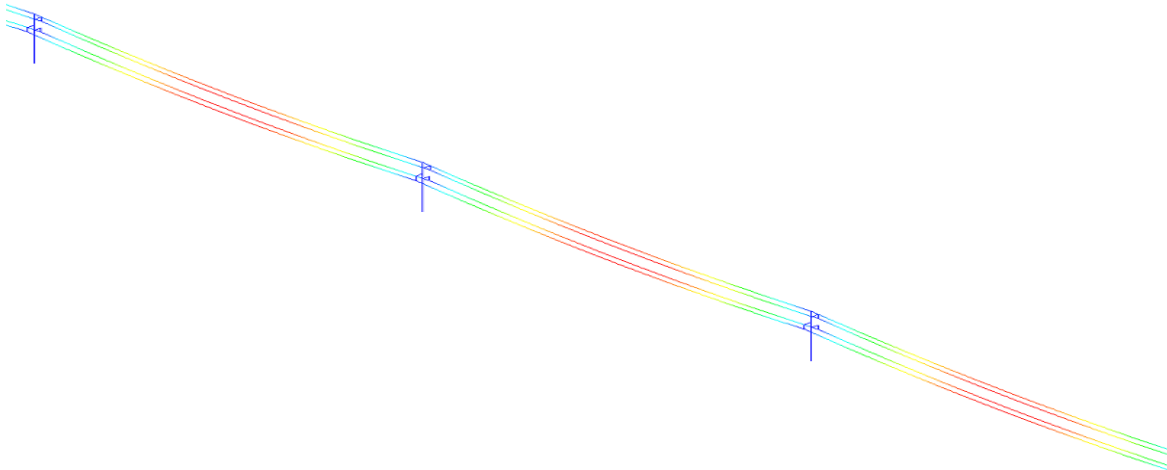


Figure 37-Post traitement sous Code\_Aster de la mise en flèche des câbles

La seconde étape est dédiée au calcul en dynamique non linéaire. Dans cette étape le canton de

ligne qui était initialement en équilibre subit des déformations importantes causées par la rupture brusque de tous les câbles au niveau du premier pylône de la ligne (figure 38). Pour cette étude, il a été choisi de faire le bris de tous les câbles, car le bris d'un seul câble ne permettait pas de provoquer une ruine en cascade du canton pour des pylônes de rigidité équivalente aux pylônes du canton original présenté par Mozer. La rupture a été modélisée par l'élimination des forces statiques équivalentes présentées à l'étape précédente.

L'étude dynamique se déroule sur quatre secondes selon un pas de 0,01 seconde.

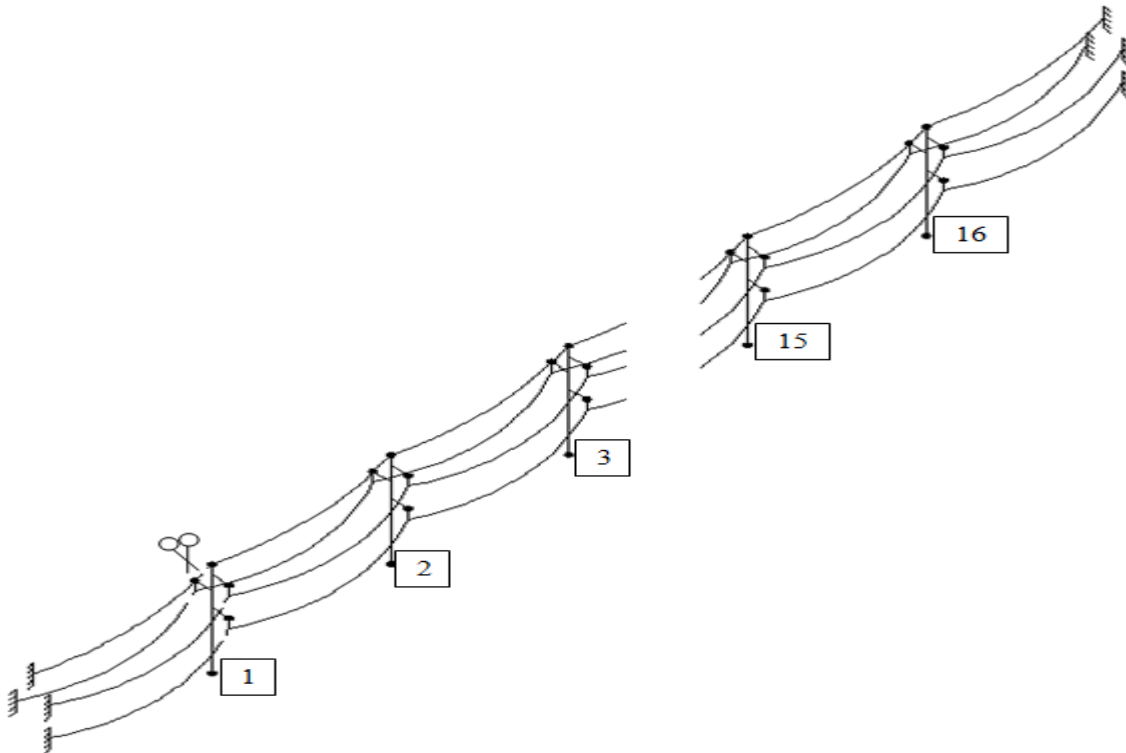


Figure 38-Position du point de bris du canton étudié

## 4. Étude de sensibilité

### 4.1. Incrément de temps

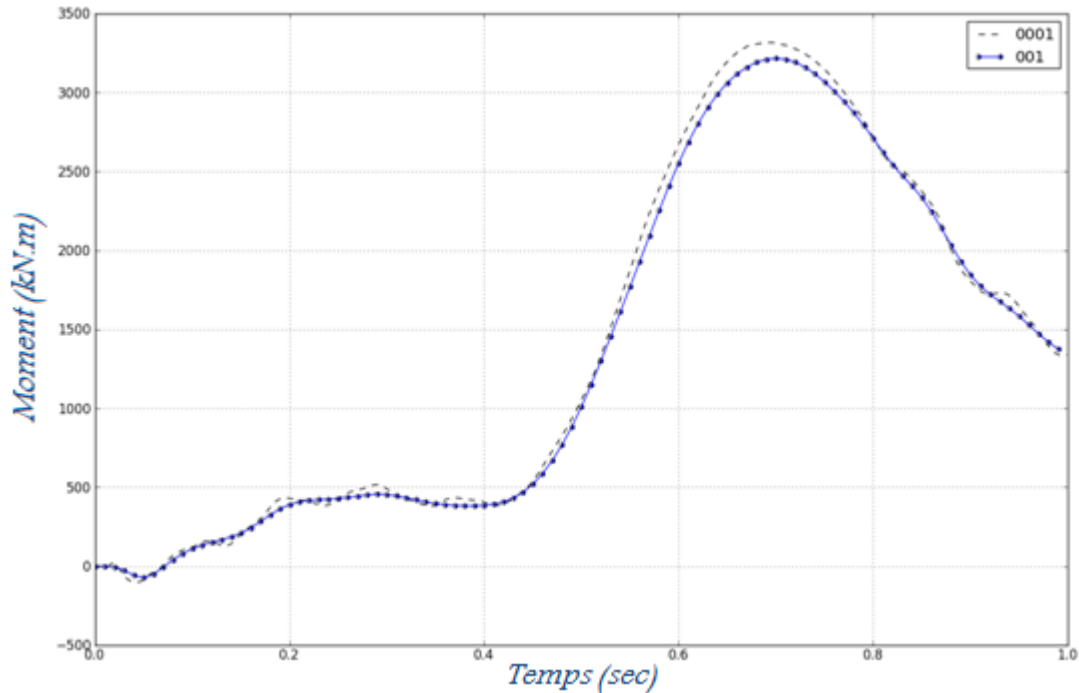


Figure 39- Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents incréments de temps- Liso=2,1336m-Tension=25%RTS- Portée =152,4 m

La figure 39 compare le moment obtenu à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents pas de temps, soit 0,001 et 0,01 seconde, sur une durée d'analyse d'une seconde. Comme on peut le constater, la concordance des deux courbes est très bonne globalement et présente une erreur de 3% par rapport au moment maximum obtenu à la base du pylône adjacent au point de bris. Cependant, le choix d'un pas de temps de 0,01 seconde permet un gain remarquable en temps d'où son choix pour le reste des analyses.

### 4.2. Discrétisation des éléments

Deux vérifications ont été faites pour valider le choix de la discrétisation décrite à la figure 36. La première étant de vérifier la discrétisation des pylônes formant le canton d'étude et la seconde vérification concerne le nombre d'éléments de maillage des câbles conducteurs et du câble de garde du modèle.

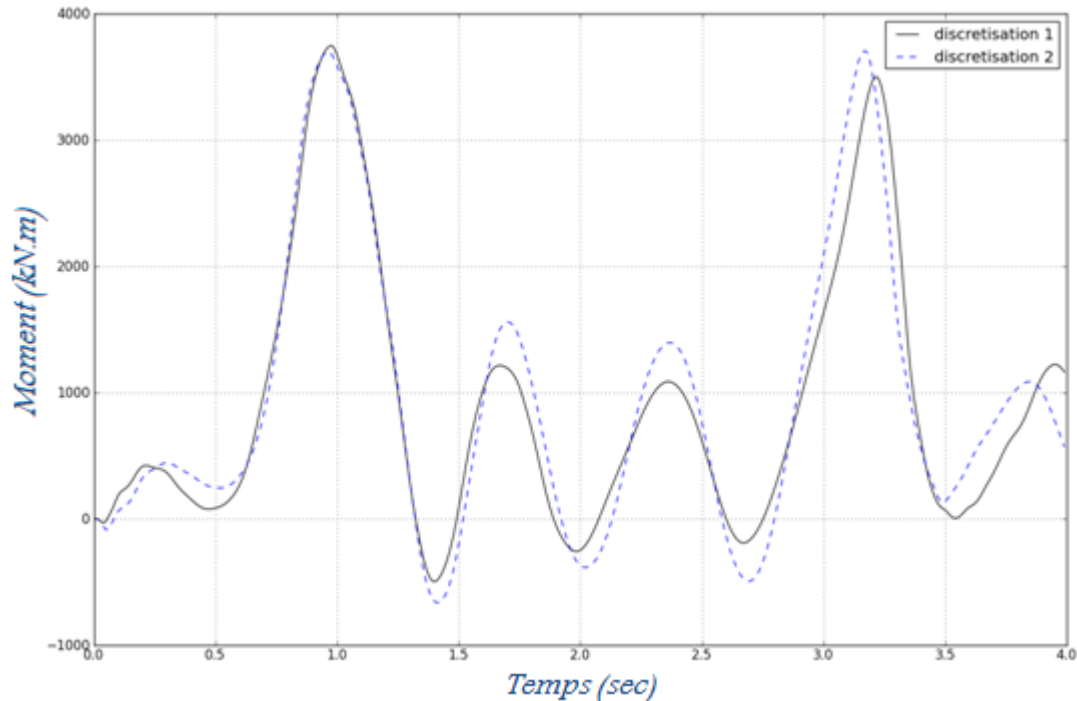


Figure 40- Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents maillages des pylônes- Liso=2,1336m-Tension=25%RTS- Portée =152,4 m

La figure 40 compare les deux résultats obtenus des moments à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents maillages des pylônes. La courbe en trait continu (discretisation 1) correspond à la discrétisation des éléments des pylônes mentionnée à la figure 36 pour le cas de référence (25% RTS, portée=152,4 m, Comportement élastique), alors que la courbe en trait discontinu (discretisation 2) correspond à un maillage double du maillage précédent, c'est-à-dire deux fois plus fin. Comme on peut le constater les deux courbes de la figure 40 présentent quelques différences mais restent en tout temps très semblable. L'erreur relative entre les deux pics des moments maximums obtenus à la base du pylône adjacent au point de bris est de 1%. Ceci a permis d'adopter la première discrétisation des éléments des pylônes (figure 36) pour le reste des analyses entreprises lors de ce projet de maîtrise afin de réduire au maximum le temps des analyses.

Le choix de la discrétisation des câbles a été vérifié de la même façon. La figure 41 permet de comparer la réponse dynamique du moment à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents maillages des câbles, soit un maillage de 150 et 300 éléments par portée. Les deux courbes obtenues sont identiques et permettent de valider le maillage des câbles présenté à la figure 36.



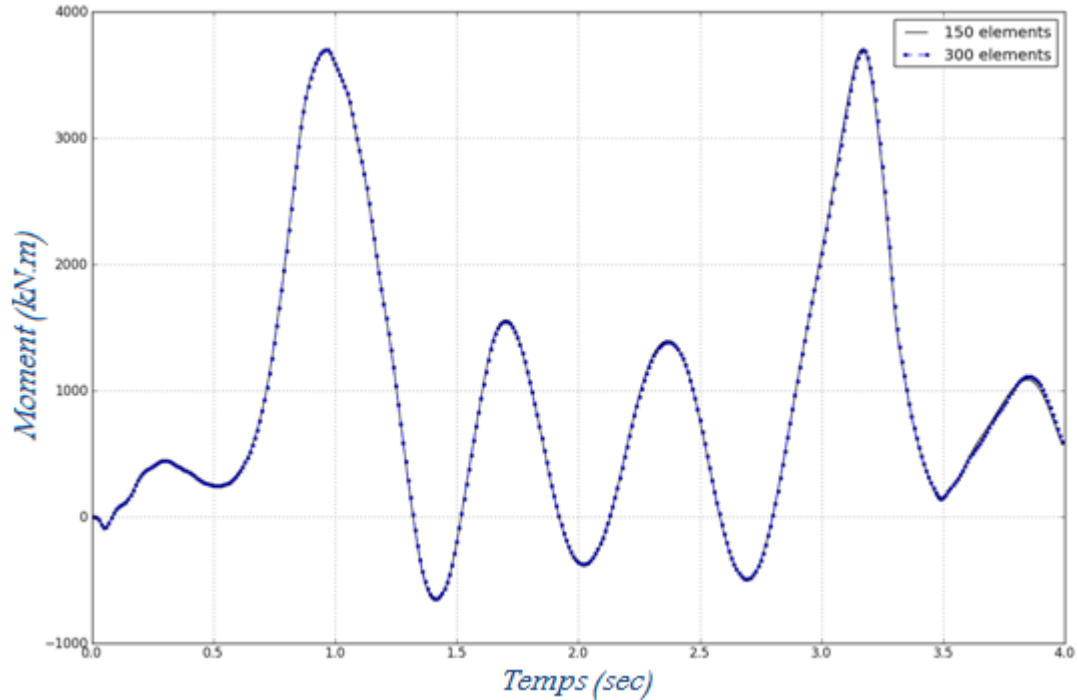


Figure 41- Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents maillages des câbles-  
*Liso=2,1336m-Tension=25%RTS- Portée =152,4 m*

#### 4.3.Choix de la durée de l'analyse

La durée d'analyse a été choisie de façon à identifier le second pic appelée généralement pic de retour d'onde bien que l'objectif de ce projet était de voir l'effet de l'onde incidente. On a essayé d'inclure l'onde de retour dans le temps d'analyse vue que dans quelques essais à grandeur réelle, le second pic dû à l'onde de retour pourrait être supérieure au pic initial. Une estimation de la vitesse de propagation de l'onde a été calculée selon l'équation suivante :

$$v = \sqrt{\frac{F}{m}} \quad (27)$$

Avec F est la tension dans le câble et m est la masse linéaire du câble donnée en kg/m.

Le temps requis d'un aller-retour de l'onde est par la suite calculé en fonction de la vitesse de propagation de l'onde. Les calculs de la vitesse d'onde et du temps requis pour un aller-retour de l'onde sont regroupés au tableau 9 pour le cas de référence 25%RTS, portée= 152,4 m.

Tableau 9- Propriétés de l'onde de propagation

	$v$ (m/s)	Temps requis (s)
Câble conducteur	64,6	4,7

Câble de garde	132,6	2,3
----------------	-------	-----

La figure 42 présente l'historique de la réponse dynamique du moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris sur 10 secondes. Dans ce cas d'analyse aucune onde de retour n'a présenté un effet plus important que celui de l'onde incidente. Cependant, ces observations ne peuvent pas être généralisées pour toutes les configurations étudiées puisque le temps requis pour un aller-retour de l'onde dépend de la longueur de portée, de la tension mécanique et de la masse linéaire des câbles. Toutefois, pour limiter le temps de calcul, une durée d'analyse de 4 secondes a été sélectionnée en supposant que l'onde de retour n'a pas plus d'effet que l'onde incidente tel qu'observé à la figure 42 pour le cas de référence.

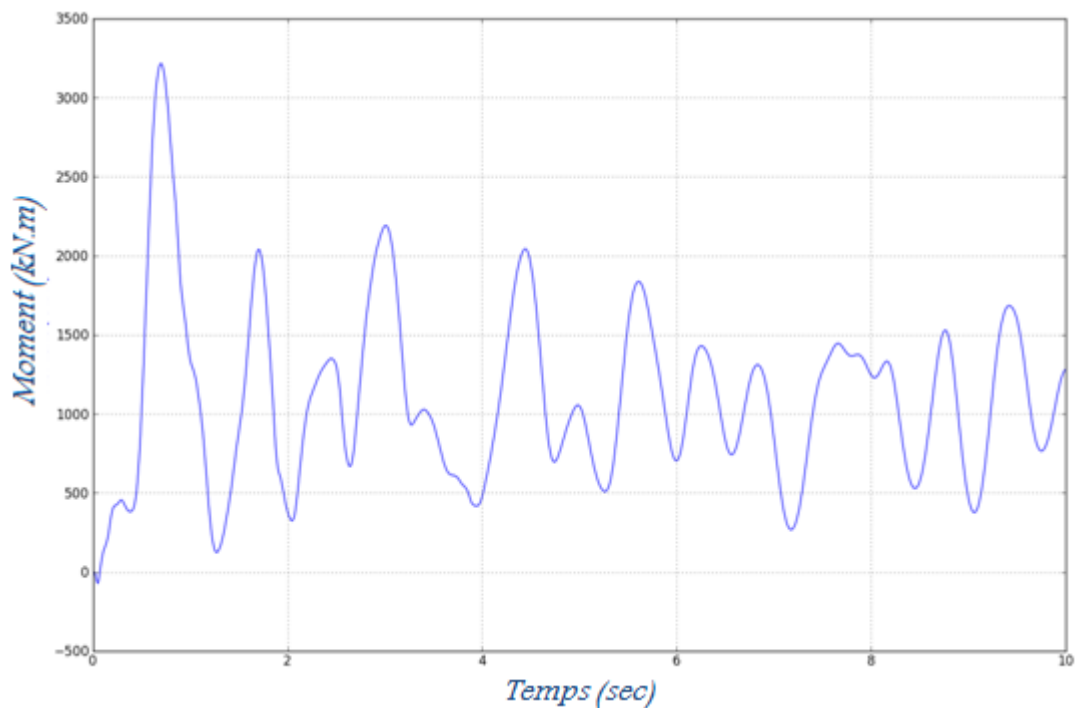


Figure 42- Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour deux différents maillages des câbles-  
Liso=2,1336m-Tension=25%RTS- Portée =152,4 m

## 5. Paramètres d'étude

### 5.1. Lois de comportement

Les lois de comportement permettent de modéliser le comportement des solides selon des lois empiriques lors de leur déformation et de connaître leur réponse suite aux sollicitations auxquelles ils sont exposés.

Trois types de comportement ont été étudiés (figure 43) :

- Élastique :
  - $E = 2,1^E 11 \frac{N}{m^2}$ .
- Élastique parfaitement plastique :
  - $E = 2,1^E 11 \frac{N}{m^2}$ .
  - $F_y = 345 \frac{N}{mm^2}$ .
  - $E_T = 0 \frac{N}{m^2}$ .
- Élasto plastique à écrouissage linéaire :
  - $E = 2,1^E 11 \frac{N}{m^2}$ .
  - $F_y = 345 \frac{N}{mm^2}$ .
  - $E_T = 1^E 10 \frac{N}{m^2}$ .

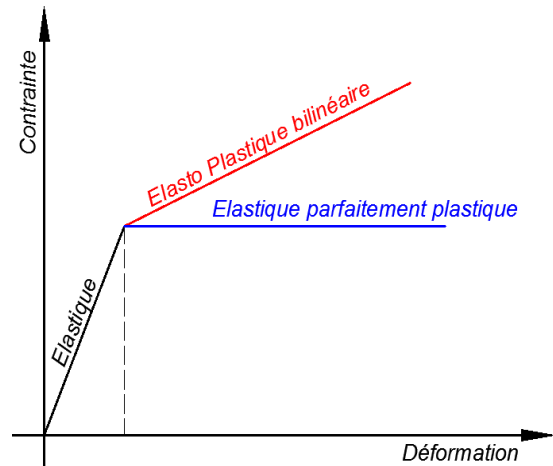


Figure 43- Courbes contrainte- déformation des lois de comportements étudiées

Avec :

- E est le module d'Young.
- $E_T$  est le module tangent.
- $F_y$  est la limite élastique.

Les lois de comportement traitées sous Code\_Aster et nécessaires à la mise en œuvre de l'algorithme non linéaire défini par l'opérateur STAT\_NON\_LINE [Abbas, 2011] et DYNA\_NON\_LINE [Greffet, 2012] sont représentées par les mots clés facteurs :

- ELAS
- VMIS\_ISOT\_LINE

Le mot clé facteur « ELAS » est relatif aux déformations élastiques. Sous l'opérateur DEFI\_MATERIAU [Lefebvre, 2014] de Code\_Aster on assigne à un matériau donné la valeur de son module d'Young noté E et on vérifie que  $E \geq 0$ . E est donné en  $N/mm^2$ .

Le comportement élastique est par la suite affecté dans l'opérateur DEFI\_COMPOR [Proix, 2009]

sous le mot clé facteur RELATION.

Il est de même pour l'affectation de la seconde loi de comportement à part quelques changements. La relation VMIS\_ISOT\_LINE [Proix, 2009] veut dire Von Mises à écrouissage isotrope linéaire. Elle est utilisable dans le cas des comportements élasto plastiques.

Les caractéristiques des matériaux sont données sous le mot clé facteur ECRO\_LINE de l'opérateur DEFI\_MATERIAU. Il s'agit du module tangent  $E_T$  défini par D\_SIGM\_EPSI et de la limite élastique défini par SY : si  $E_T=0$  N/mm<sup>2</sup> alors la loi est élastique parfaitement plastique, et si  $E_T > 0$  alors la loi est élasto plastique à écrouissage isotrope linéaire. Un fichier de commande typique est présenté à l'Annexe D.

## 5.2.Capacité des pylônes

La capacité des pylônes a été variée selon une capacité de référence identifiée pour chaque configuration du canton. Différents rayons de la section des pylônes ont été étudiés afin d'ajuster la contrainte à la base du premier pylône lors d'un bris de tous les câbles. L'épaisseur des sections a été fixée à 9,5 mm pour la portée de 152,4 m, à 12 mm pour la portée de 304,8m et à 19,05mm pour la portée de 457,2 m.

La section de référence a été calibrée de façon à avoir une contrainte maximale de 345 MPa ( $\pm 0,5$ ) à la base du pylône adjacent aux points de bris. Cette contrainte maximale correspond au moment maximal identifié sur la courbe de la figure 44 pour une réponse élastique du canton. Le niveau de capacité est par la suite déterminé en se basant sur l'équation suivante :

$$M_r = \alpha M_e \quad (28)$$

Avec :

- $M_r$  : moment de la section selon le niveau de capacité voulu.
- $M_e$  : moment élastique.
- $\alpha$  : coefficient sans dimension.

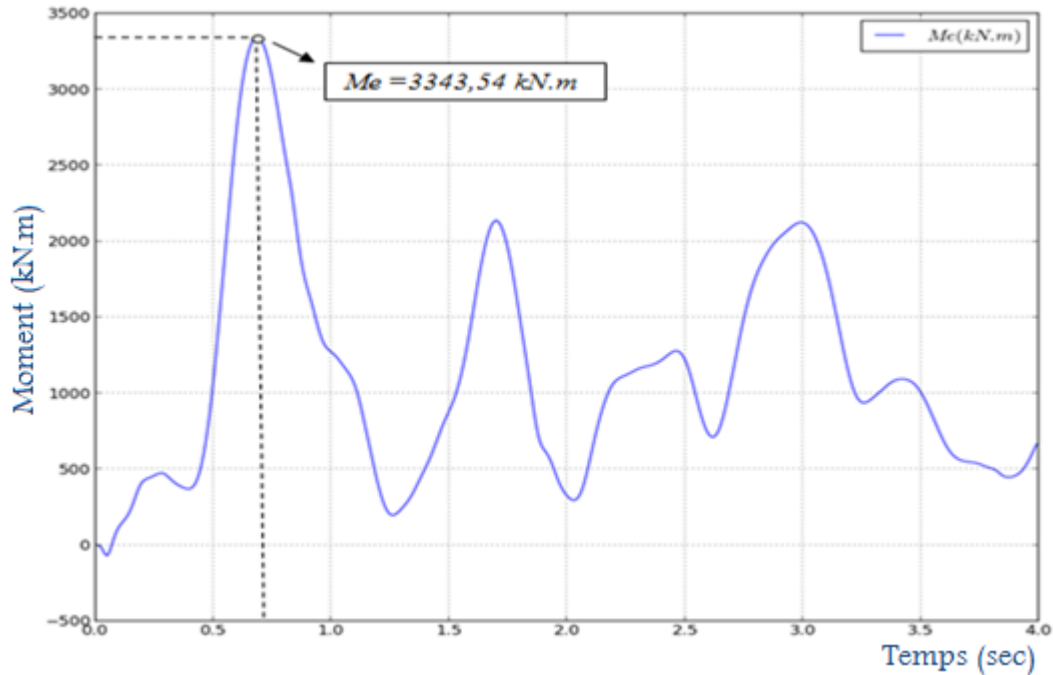


Figure 44- Courbe de référence: Moment à la base du pylône adjacent aux points de bris  
Portée =152,4m-Liso=2,1336m-Tension 25%RTS

Une fois la contrainte voulue atteinte, le choix du rayon devient valide comme rayon de référence et la section du pylône de référence est déterminée.

Le critère de flambement local a été aussi vérifié avec la norme ASCE48-05 [2005] pour toutes les sections étudiées selon:

$$\frac{D_0}{t} \leq \frac{41400}{F_y} \quad (29)$$

$D_0$  : Diamètre extérieur du poteau.

$t$  : Épaisseur du poteau.

ASCE48-05. Critère de flambement en flexion.

Par la suite, à partir des résultats fournis par Code\_Aster, le moment élastique maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris a été déterminé en traçant la courbe de variation du moment en fonction du temps lors du calcul en dynamique non linéaire. À partir de cette valeur, les nouvelles dimensions des pylônes allant de 0,1 à 0,9 fois la capacité du pylône de référence ont été définies et sont résumées aux tableaux 10 et 11.

Tableau 10- Caractéristiques des pylônes de référence

	Portée = 152,4 mètre		Portée = 304,8 mètre		Portée = 457,2 mètre	
	$R_{\text{réf}}$ (cm)	$\sigma$ (MPa)	$R_{\text{réf}}$ (cm)	$\sigma$ (MPa)	$R_{\text{réf}}$ (cm)	$\sigma$ (MPa)
Liso = 0 (m)	47,95	345,06	55,50	344,95	53,60	344,35
Liso = $Li_0$	57,50	345,02	59,36	345,03	56,60	345,50
Liso = $2Li_0$	63,93	345,03	69,73	345,16	57,60	345,29
Épaisseur(m)	0,009525		0,0127		0,01905	

$Li_0=2,1336m$  ;  $R_{\text{réf}}$  =rayon de la section de référence

Tableau 11- Caractéristiques géométrique des sections des pylônes étudiées pour les différentes longueurs de portées et longueurs des chaînes d'isolateurs.

Rayon des poteaux (m)				
Capacité (%Fr)	Liso=0m	Liso=Li <sub>0</sub>	Liso=2Li <sub>0</sub>	Épaisseur (m)
90%	0,46	0,55	0,61	0,009525
80%	0,43	0,52	0,57	
70%	0,4	0,48	0,54	
60%	0,37	0,45	0,5	
50%	0,34	0,41	0,45	
40%	0,31	0,37	0,41	
30%	0,27	0,32	0,35	
20%	0,22	0,26	0,29	
10%	0,16	0,19	0,21	

Portée =152,4 m ; Li<sub>0</sub>=2,1336m

Rayon des poteaux (m)				
Capacité (%Fr)	Liso=0m	Liso=Li <sub>0</sub>	Liso=2Li <sub>0</sub>	Épaisseur (m)
90%	0,53	0,56	0,66	0,0127
80%	0,50	0,53	0,62	
70%	0,47	0,5	0,58	
60%	0,43	0,46	0,54	
50%	0,40	0,42	0,50	
40%	0,36	0,38	0,44	
30%	0,31	0,33	0,39	
20%	0,25	0,27	0,32	
10%	0,18	0,19	0,23	

Portée =304,8 m ; Li<sub>0</sub>=2,1336m

Rayon des poteaux (m)				
Capacité (%Fr)	Liso=0m	Liso=Li <sub>0</sub>	Liso=2Li <sub>0</sub>	Épaisseur (m)
90%	0,51	0,54	0,55	0,01905
80%	0,48	0,51	0,52	
70%	0,45	0,48	0,48	
60%	0,42	0,44	0,45	
50%	0,38	0,4	0,41	
40%	0,34	0,36	0,37	
30%	0,30	0,32	0,32	
20%	0,25	0,26	0,27	
10%	0,18	0,19	0,19	

Portée =457,2 m ; Li<sub>0</sub>=2,1336m

### 5.3. Tension dans les câbles

La tension des câbles conducteurs et du câble de garde a été variée en ajustant le poids des câbles pour simuler une accumulation de glace.

Afin de faciliter le processus, une série d'analyses en statique non linéaire a été entreprise avec Code\_Aster pour chacune des portées étudiées. Pour chaque analyse, la masse volumique des conducteurs a été variée de 3000 à 24000 kg/m<sup>3</sup>. Les résultats obtenus par Code\_Aster ont fourni les efforts statiques horizontaux dans les câbles.

Une courbe tenant compte de la masse volumique du câble conducteur en fonction de la tension correspondante a été déterminée afin de faciliter la lecture puis l'entrée des données sous Code\_Aster (figure 45).

Les masses volumiques qui correspondent à des tensions de 25 (tension initiale), 30, 40, 50 et 60 % de RTS ont été étudiées lors de ce projet de maîtrise.

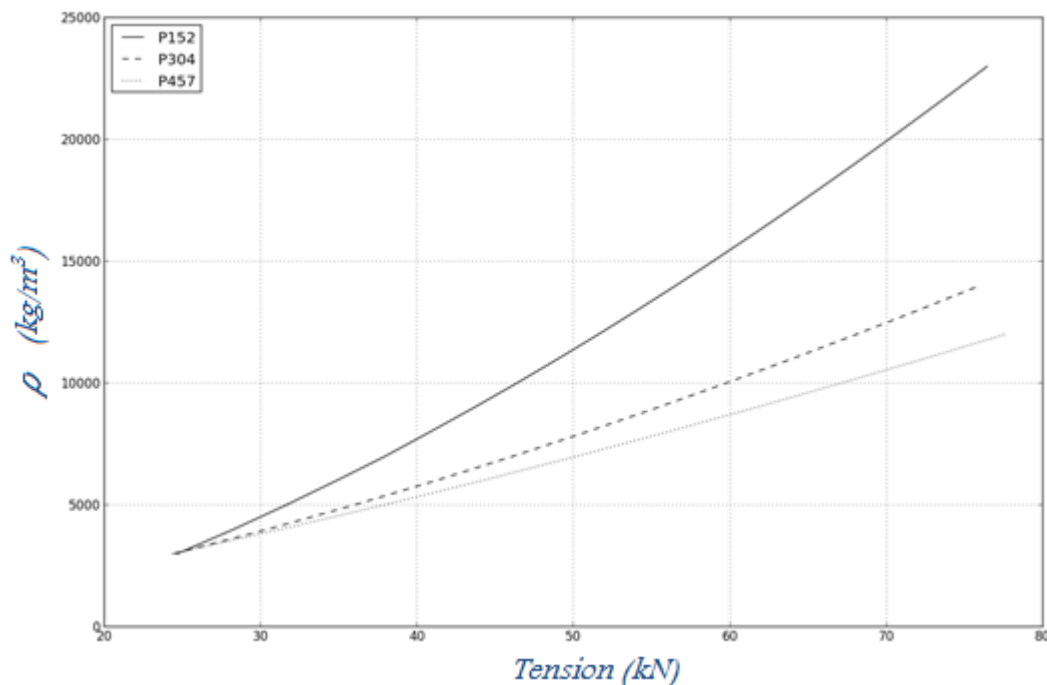


Figure 45-Masse volumique du câble conducteur en fonction de sa tension donnée en pourcentage de RTS

Par contre, la masse volumique de la même épaisseur de glace sur le câble conducteur a été ajoutée sur le câble de garde. Étant donné que les propriétés du câble de garde sont différentes de celles du conducteur, la tension dans les conducteurs et les câbles de garde n'est pas la même.

L'épaisseur de glace a été calculée selon l'équation suivante :

$$g = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot \delta \cdot t \cdot \left( d + \frac{t}{1000} \right) \quad (30)$$

$g$  est le poids linéique de glace.

$\delta = 900 \text{ kg/m}^3$  est la masse volumique de la glace.

$t$  est l'épaisseur de glace en millimètre.

$d$  est le diamètre du câble en mètre.

L'épaisseur de glace nécessaire pour acquérir une tension donnée dans les câbles conducteurs a été aussi représentée dans le graphique ci-dessous afin de déterminer facilement l'épaisseur de glace nécessaire pour la mise en tension des câbles.

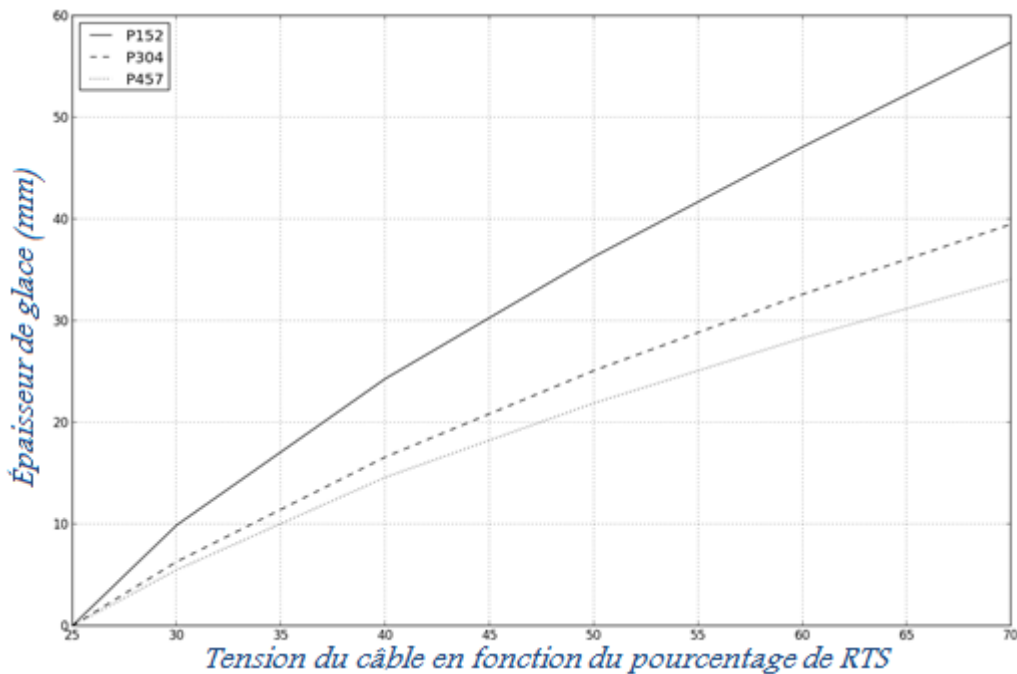


Figure 46-Épaisseur de glace en fonction de la tension du câble donnée en pourcentage de RTS

L'épaisseur de glace correspondante à une tension donnée dans les câbles conducteurs est ensuite réinjectée dans l'équation (30) pour déterminer la nouvelle masse volumique à placer sur le câble de garde.

#### 5.4. Longueur de portée

Les longueurs des portées choisies au cours de ce projet de maîtrise sont :

- $P_0 = 152,4$  mètres.
- $2 \times P_0 = 304,8$  mètres.
- $3 \times P_0 = 457,2$  mètres.



### 5.5. Longueur des chaînes d'isolateurs

Trois longueurs des chaînes d'isolateurs ont été étudiées :

- 0 mètre.
- $L_{iso0}=2,1336$  mètres.
- $2x L_{iso0}=4,2672$  mètres.

## 6. Description des résultats

Les résultats primaires obtenus par Code\_Aster sous forme de fichiers texte sont les efforts à la base de tous les poteaux de la ligne, soit seize poteaux et les contraintes dans chacune des fibres des sections des poteaux. Le premier résultat a servi d'une part comme affirmation que le modèle répond bien à la loi de comportement assignée et d'autre part comme moyen qui traduit la réponse dynamique des moments à la base des pylônes en fonction du temps.

Cependant, les résultats de calcul des contraintes à la base de tous les pylônes de la ligne aérienne sont les plus intéressants pour cette recherche. À l'aide d'un outil développé en langage python, tous les fichiers résultats obtenus à la fin de l'analyse sont traités un par un puis reporté dans des tableaux prenant en considération uniquement la contrainte maximale en valeur absolue pour chaque section. Le tableau suivant est un exemple typique de la contrainte maximale en MPa:

Tableau 12- $L_{iso}=2,1336m$ -Portée= $152,4m$ -Tension= $25\%RTS$ -Élastique

		Capacité des pylônes de 0,1 à 0,9 fois la capacité de référence								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Numéro du pylône	1	1385,4	866,1	703,2	597,2	527,8	474,3	432,5	398,4	370,3
	2	871,0	548,7	385,4	282,5	229,8	200,5	181,1	166,3	154,4
	3	655,8	375,7	262,6	208,8	175,7	150,5	131,4	116,6	104,9
	4	521,4	290,0	216,0	168,3	134,5	110,2	92,6	79,6	69,9
	5	426,1	243,7	178,1	133,6	105,7	87,7	74,5	64,3	56,1
	6	353,3	204,8	150,2	117,7	96,1	80,1	67,8	58,1	50,3
	7	297,6	179,6	136,8	108,6	88,2	73,3	61,5	52,4	45,1
	8	251,8	161,7	123,9	97,9	79,5	66,0	55,4	47,3	40,8
	9	209,9	144,0	108,8	85,7	70,0	58,6	49,9	42,9	37,2
	10	183,5	124,9	93,1	73,5	60,7	52,6	45,8	42,1	35,9
	11	161,1	105,7	77,9	62,4	52,2	47,5	48,6	40,3	30,2
	12	143,7	88,9	64,0	52,4	44,2	49,9	45,0	32,5	27,4
	13	119,8	72,1	51,9	43,0	41,4	46,1	35,9	28,4	23,3
	14	90,5	60,8	44,1	34,2	40,7	36,0	30,9	24,1	19,1
	15	65,1	49,9	41,4	28,2	29,3	29,7	24,1	19,1	16,0
	16	39,6	31,3	26,6	23,2	21,0	20,2	15,5	12,9	11,9

Ces tableaux sont par la suite traités à nouveau avec une deuxième routine python permettant de tracer le nombre de pylônes endommagés en fonction de la capacité des supports. Le critère d'endommagement des pylônes est l'atteinte de la contrainte maximale de 345 MPa tout en vérifiant que le flambement local n'est pas critique (équation 29).

### 6.1.Observations générales

La réponse dynamique due à la rupture de tous les câbles montre que le moment à la base du pylône adjacent aux points de rupture initialement nuls subi une première augmentation (figure 44) due principalement aux efforts dynamiques provenant de la rupture du câble de garde, décline quelque peu, puis remonte jusqu'à l'alignement des chaînes d'isolateurs avec le câble conducteur où le moment atteint son maximum.

Ceci est d'autant plus clair en post traitement sous Code\_Aster. La figure 47 montre clairement que la fréquence de vibration du câble de garde est plus grande que celle des câbles conducteurs. En effet, on remarque le retour de l'onde réfléchi dans le câble de garde bien que l'onde incidente dans les conducteurs continue à se propager le long des câbles conducteurs.

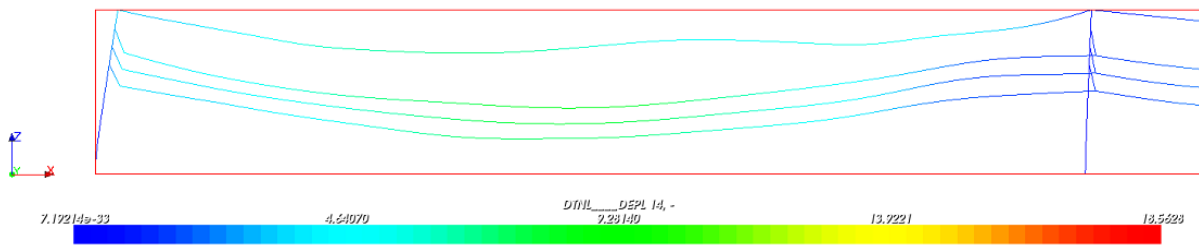


Figure 47-Réponse dynamique d'un bris de câbles en Post traitement sous Code\_Aster-Portée=152,4m-  
Liso=2,1336m-Tension=25%RTS

## 7. Résultats des calculs et interprétations

### 7.1.Résultats du cas de référence

Les paramètres d'étude du cas de référence illustré dans cette section sont présentés au tableau suivant :

Tableau 13- Paramètres du cas de référence

Portée (m)	L iso (m)	Rayon (m)	Épaisseur (m)
152,4	2,1336	0,575	0,009525

Le cas de référence a été étudié pour les différentes lois de comportement, soit en élastique, en élastique parfaitement plastique et en élasto plastique bilinéaire.

Les courbes des moments à la base de chaque pylône de la ligne soumise aux bris de câbles pour une capacité de  $\alpha=0,1$  et  $\alpha=0,5$  et les trois différentes lois de comportement sont présentées dans les figures 48 à 53.

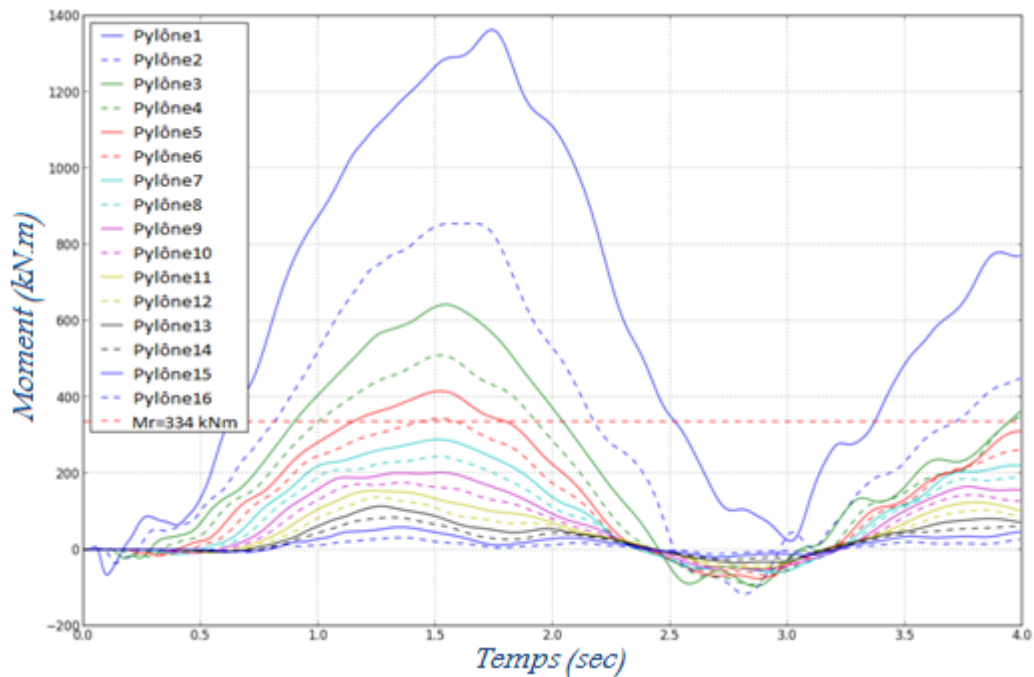


Figure 48-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 10%-Comportement élastique

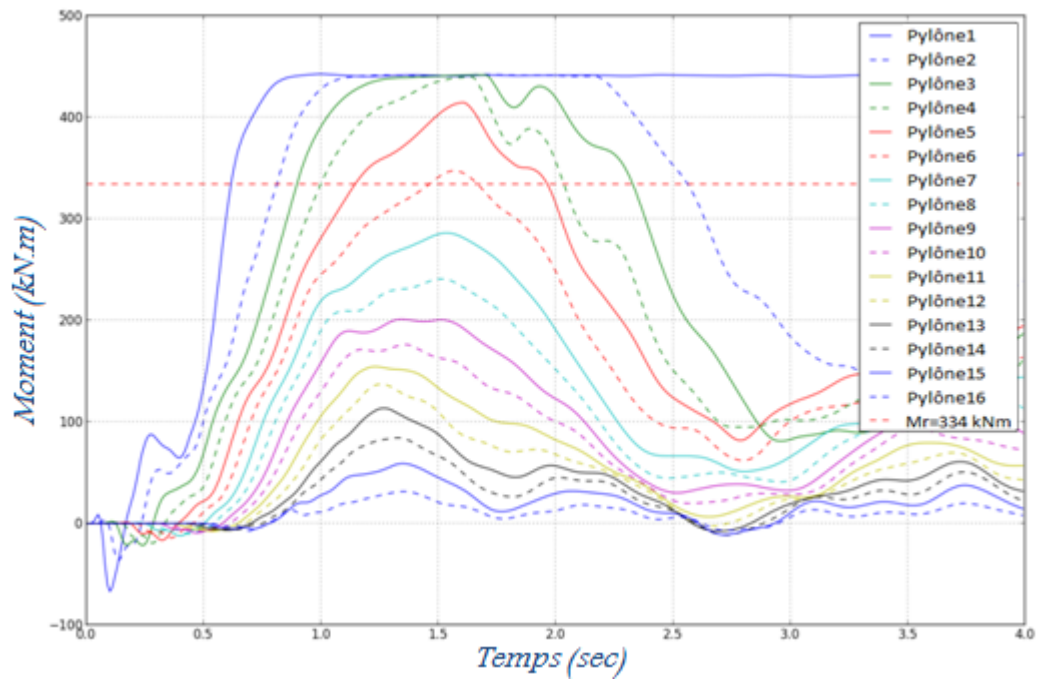


Figure 49-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 10%-Comportement élastique parfaitement plastique

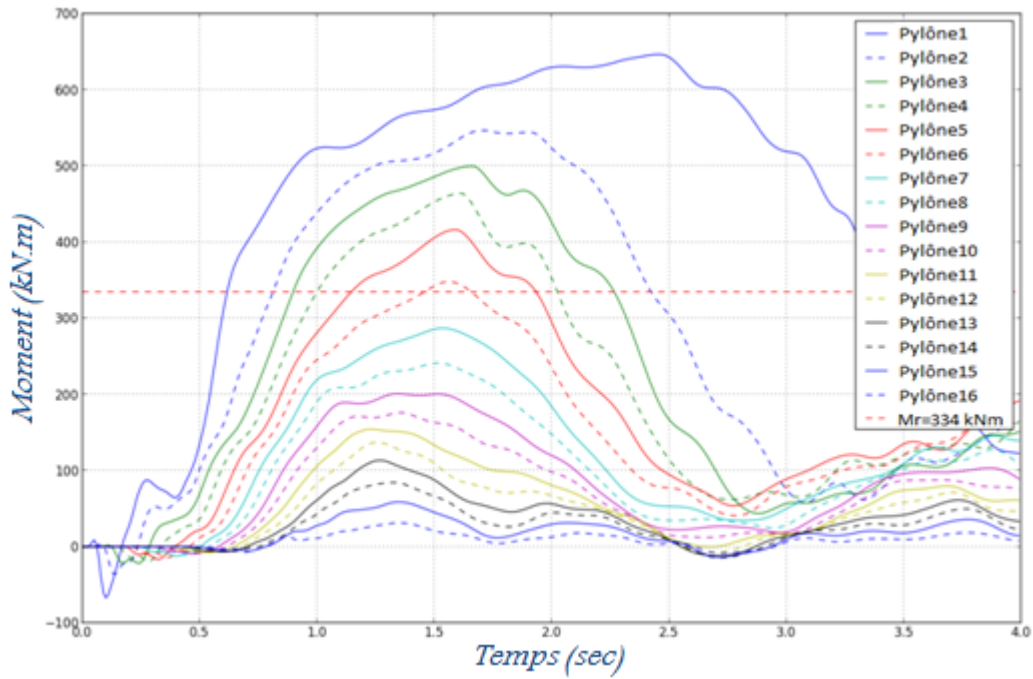


Figure 50- Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 10%-Comportement élasto plastique bilinéaire

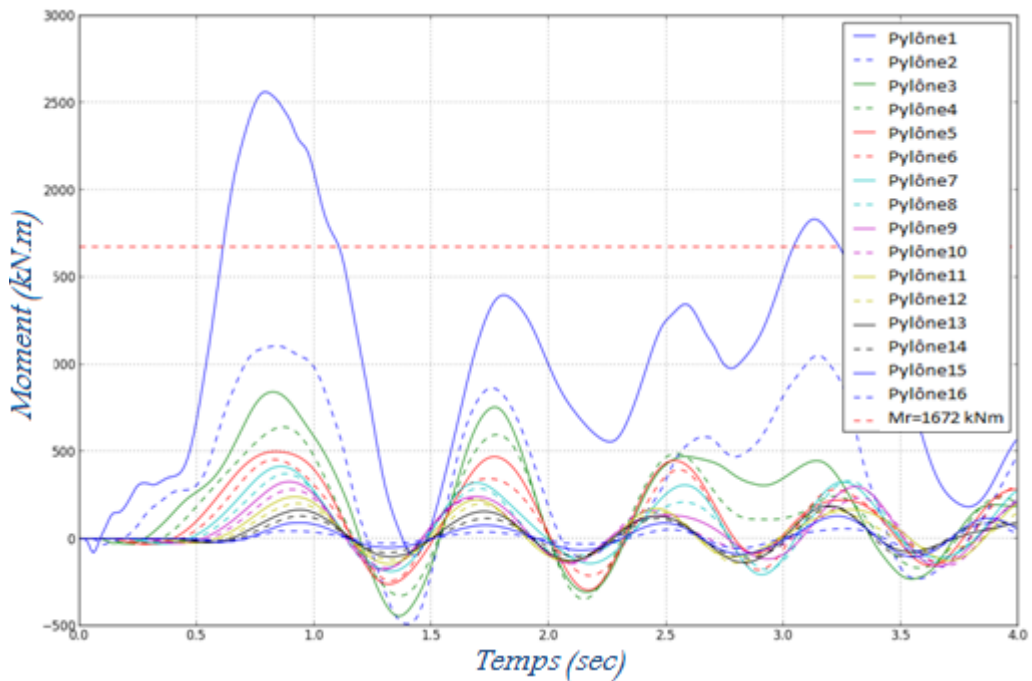


Figure 51-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 50%-Comportement élastique

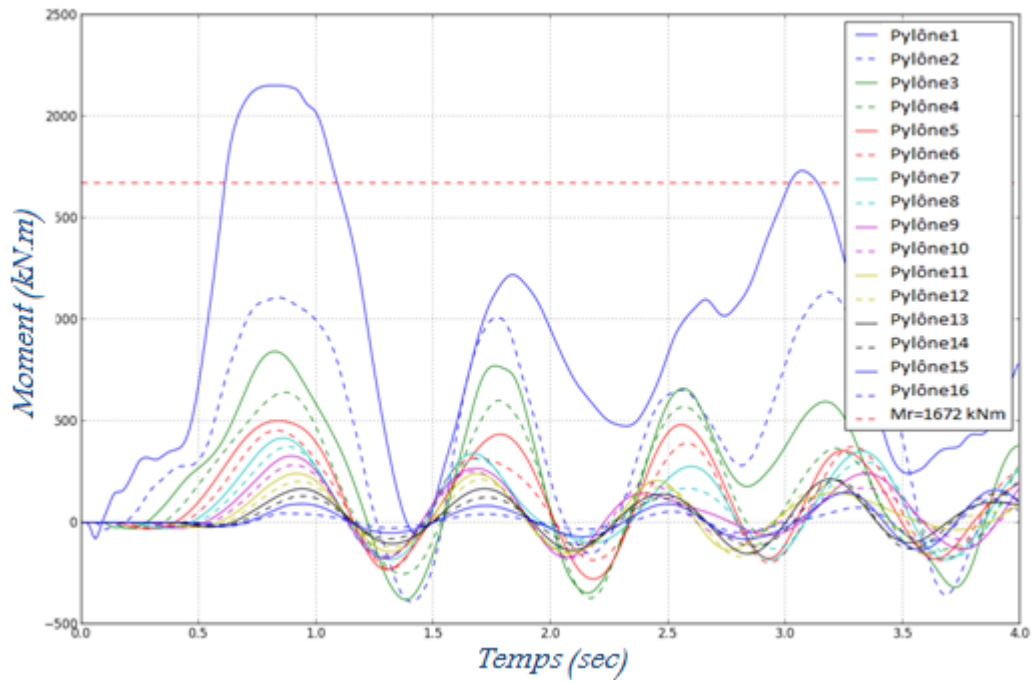


Figure 52-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 50%-Comportement élastique parfaitement plastique

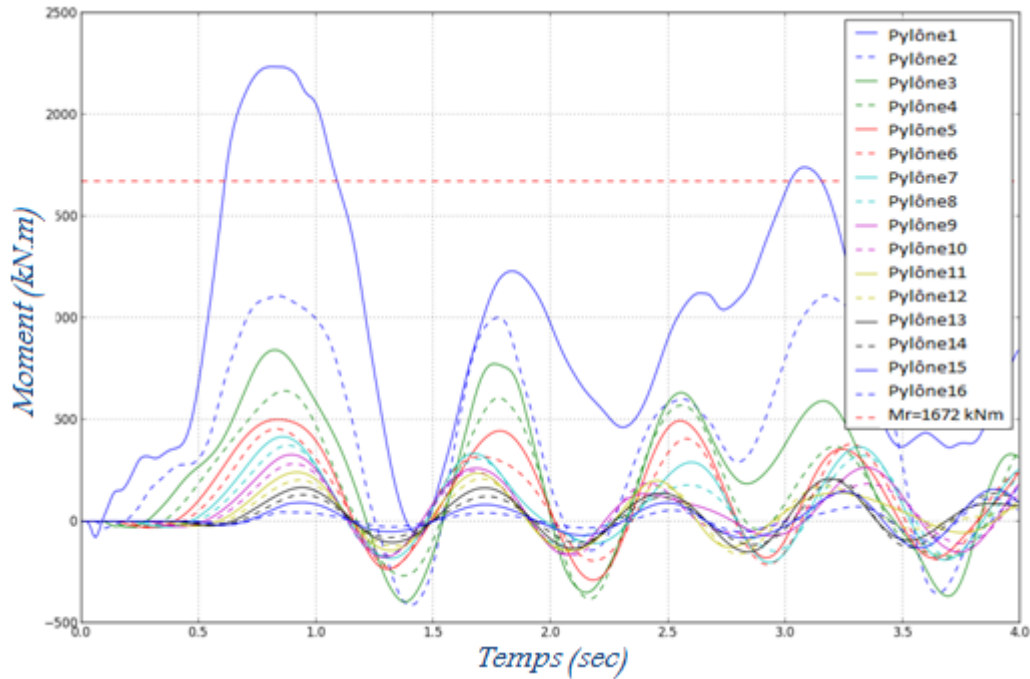


Figure 53-Moment à la base des pylônes de la ligne-Capacité 50%-Comportement élasto plastique bilinéaire

Les courbes ont pu traduire les différentes lois de comportement assignées au matériau des pylônes. Chaque ligne des figures 48 à 53 représente la variation du moment en fonction du temps à la base de chaque pylône du canton étudié. La ligne droite en pointillé sur chacune des figures est le moment  $M_r$  calculé analytiquement. Les courbes dépassant cette ligne droite correspondent au nombre de pylônes dont la contrainte à la base dépasse la contrainte limite de référence, soit 345 MPa ou la contrainte de voilement locale décrite à l'équation 29.

La variation du moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris est représentée aux figures 54 à 56 selon la loi de comportement considérée.

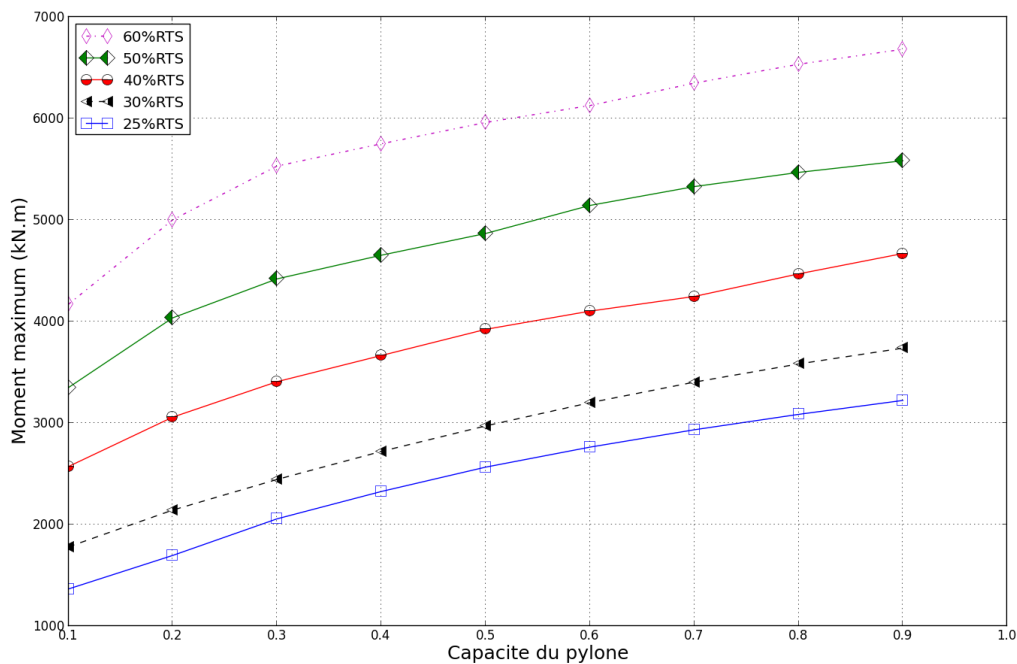


Figure 54-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m

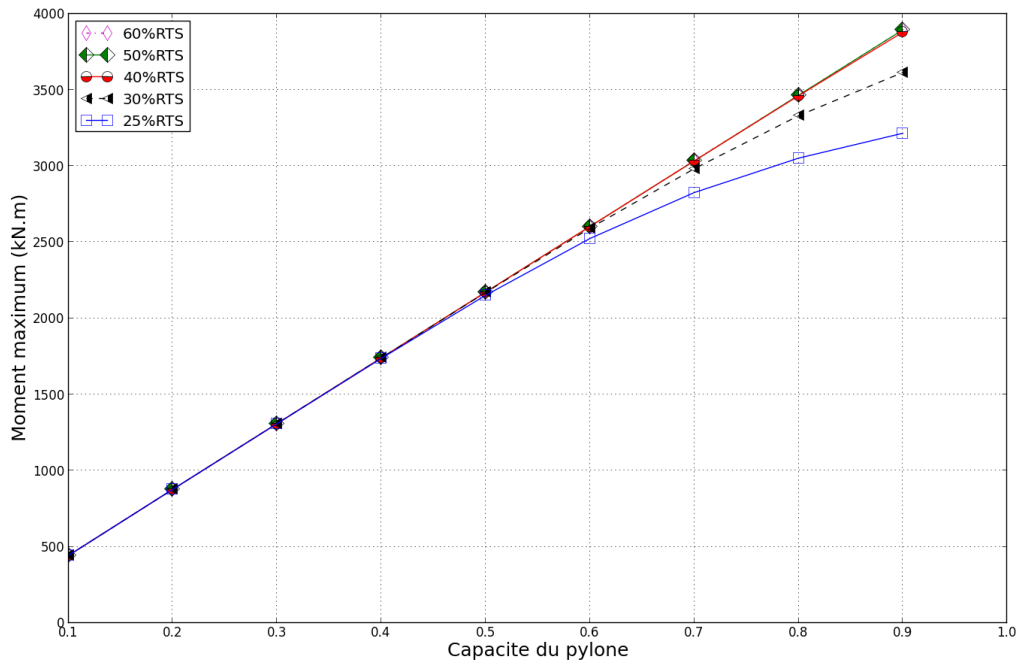


Figure 55-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m

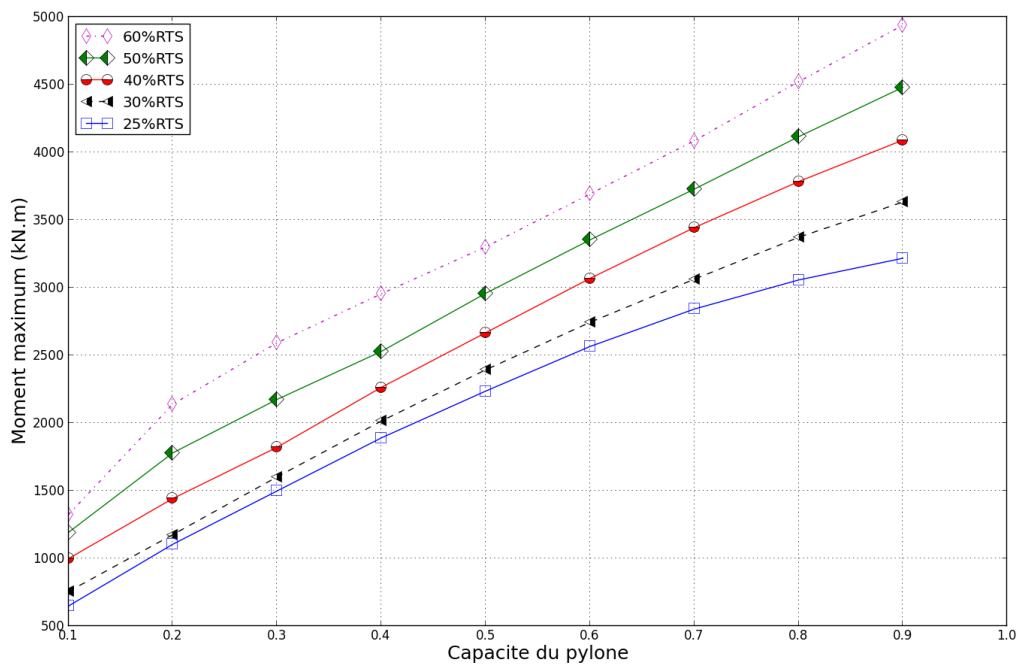


Figure 56-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m



La variation du moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris pour les différentes tensions des câbles est beaucoup plus faible en Comportement élastique parfaitement plastique qu'en élasto plastique bilinéaire et élastique. Cependant l'intensité des moments est plus accentuée en élastique qu'en élasto plastique bilinéaire et en élastique parfaitement plastique. L'apport du choix de la loi de comportement vis-à-vis l'étendue de la cascade sera étudié dans une section à part.

Le genre de graphique qu'on cherche à établir à la fin de chaque résultat de calcul tiendra compte du nombre de pylônes affectés de la ligne soumise aux bris de câbles en fonction de la capacité des pylônes tout en variant chaque fois la tension des câbles, la loi de comportement des matériaux, la longueur des portées et la longueur des chaînes d'isolateurs. La figure 57 montre un exemple de courbe N- $\alpha$  où N est le nombre de pylônes ayant atteint le critère d'endommagement, soit la plastification de la section et  $\alpha$  est le rapport du moment résistant du pylône tubulaire sur le moment élastique maximal pour le cas où le pylône atteint tout juste la limite de contrainte de 345 MPa lors du bris des câbles.

Comme prévu, la figure 57 montre que le nombre de pylônes affectés diminue lorsque la capacité du pylône augmente. Aussi, le nombre de pylônes affectés augmente de façon importante lorsque la tension augmente, simulant un chargement de glace sur le câble. Pour cette configuration du canton de pylônes tubulaires, à partir d'une capacité autour de  $\alpha = 0.4$ , le nombre de pylônes affectés atteint un niveau relativement faible. En produisant ces courbes pour les paramètres spécifiques de la ligne à concevoir, un concepteur pourrait prendre une décision rationnelle sur la capacité à donner aux pylônes pour limiter l'étendue de la ruine à un nombre de pylône jugé acceptable.

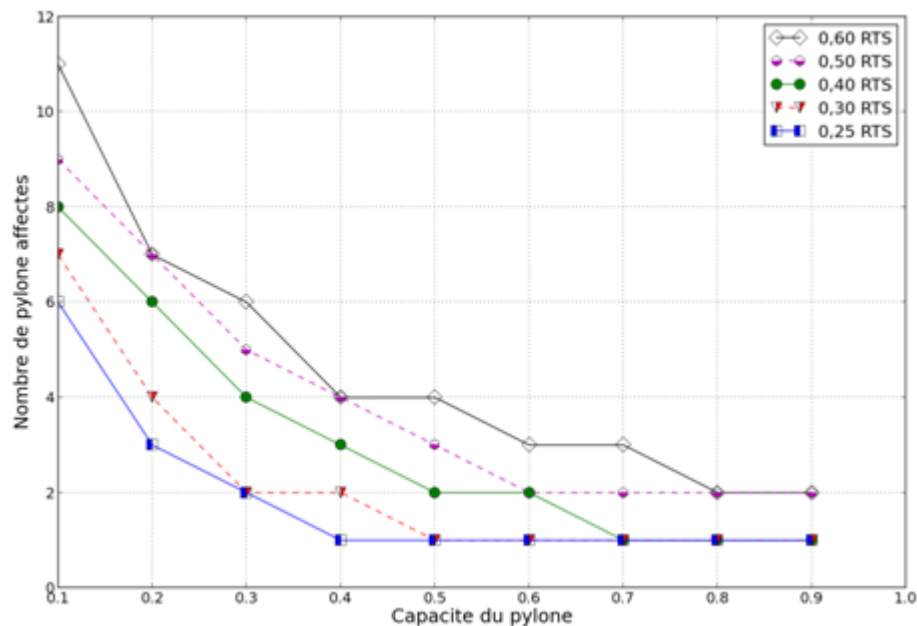


Figure 57-Nombre de pylônes affectés en fonction de leur capacité-Portée=152,4 m-Liso=2,1336m-Ecoulement élastique

### 7.1.1. Autre hypothèse étudiée pour le cas de référence

Une épaisseur de glace équivalente à celle appliquée sur les câbles a été ajoutée sur les différents éléments de la structure (poteau, console et isolateurs). Ceci avait pour but de prévoir un cas de chargement extrême sur la ligne.

Tableau 14-Paramètres d'entrée sous Code\_Aster de la structure avec glace

Éléments	$\rho_{\text{glace}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\rho_{\text{total}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	
Capacité du pylône	0,1	55,9	7906
	0,2	75,7	7926
	0,3	90,8	7941
	0,4	103,6	7954
	0,5	114,9	7965
	0,6	125,1	7975
	0,7	134,4	7984
	0,8	143,1	7993
	0,9	151,3	8001
Console	29,9	7880	
Isolateur	17,8	7868	

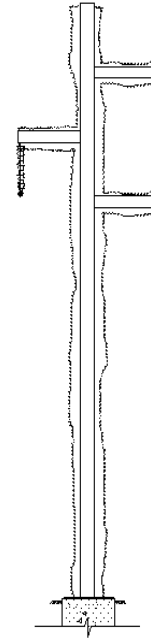


Figure 58-Structure entourée de glace sur toutes ses composantes

La masse volumique de glace a été calculée par rapport à une épaisseur de glace de 47 mm qui est équivalente à une tension de 60% de la limite élastique des câbles. La masse volumique totale des différents éléments de la structure est la sommation de la masse volumique du matériau de chaque élément et celle de l'épaisseur de glace qui l'entoure. Cette dernière a été calculée pour les différentes capacités de pylône étudiées.

Cette hypothèse a été étudiée pour une seule série de calcul (Portée=152,4 mètre, Liso=2,1336 mètre, tension= 60%RTS) vue que les résultats n'ont montré aucune différence avec le cas sans glace. Les résultats sont montrés aux figures 59 et 60.

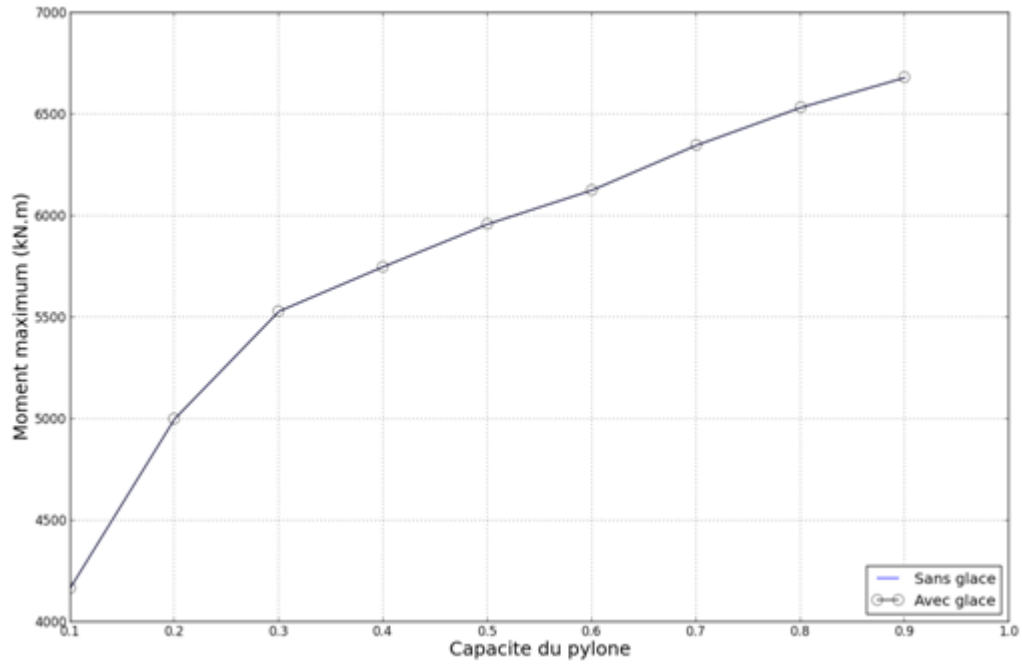


Figure 59- Différence entre moments maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris pour le cas sans glace et avec glace sur le pylône-Portée=152,4 m-Liso=2,1336m-Tension=60% RTS-Comportement élastique

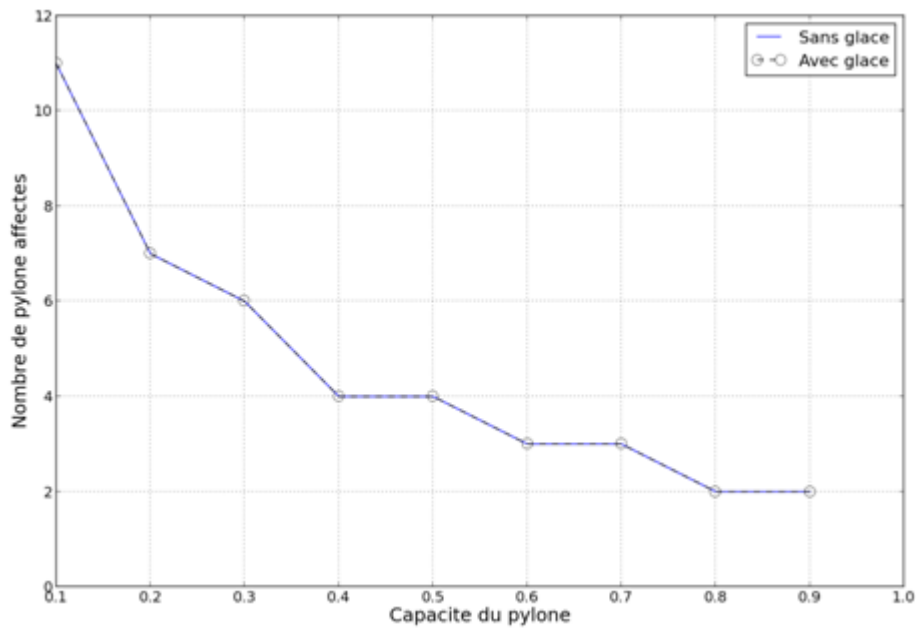


Figure 60- Nombre de pylônes affectés pour le cas avec et sans glace-Portée=152,4 m-Liso=2,1336m-Tension=60% RTS-Comportement élastique

## 7.2. Influence de la longueur des portées

### 7.2.1. Résultats

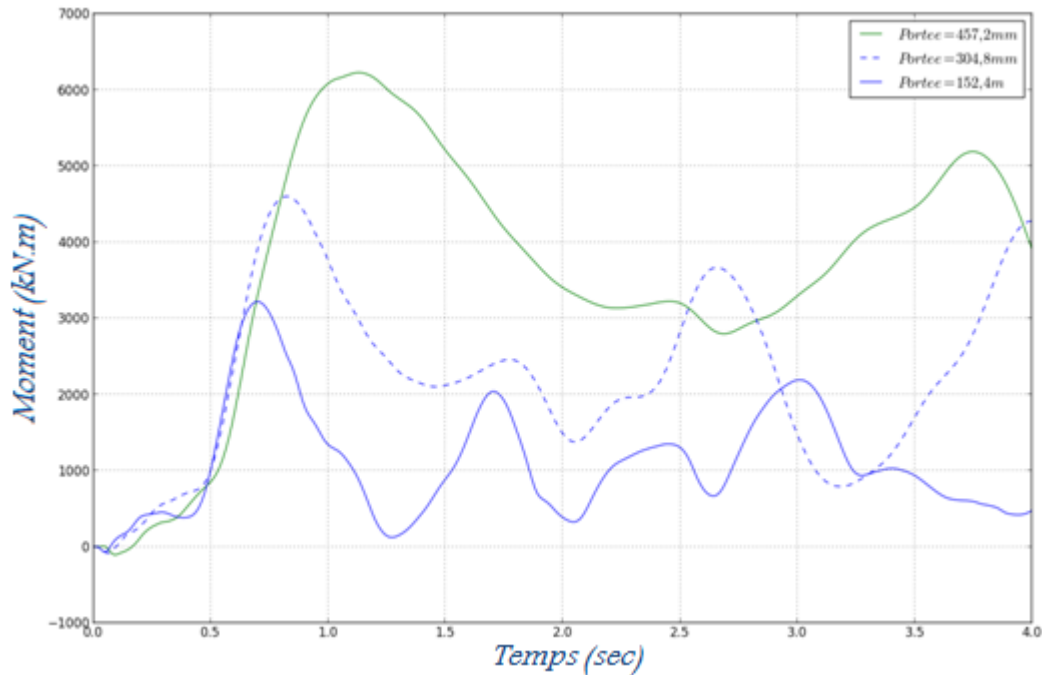


Figure 61-Moment élastique à la base du pylône adjacent au point de bris pour les différentes longueurs de portées étudiées-Liso=2,1336m-Tension=25%RTS

Pour la même tension des câbles et la même longueur des chaînes d'isolateurs, il est observé à la figure 61 que plus la portée est grande plus le moment à la base du pylône adjacent aux points de bris est élevé. Effectivement, plus la portée est grande, plus longs sont les câbles et donc plus les déplacements et les forces d'inertie associées sont élevées.

Tableau 15-Influence de la longueur de portée sur la réponse dynamique

Portée (m)	1 <sup>er</sup> pic		2 <sup>ème</sup> pic		Différence	
	Moment (kN.m)	t (sec)	Moment (kN.m)	t (sec)	$(M_1-M_2)/M_1$	$t_2-t_1$ (sec)
152,4	3221	0,7	2000	1,7	38%	1
304,8	4600	0,82	3654	2,65	21%	1,83
457,2	6225	1,13	5173	3,74	17%	2,61

### 7.2.2. Observations

Le tableau 15 montre que plus la portée est longue plus sa période dynamique est longue et plus la durée séparant le premier et le second pic est grande. De plus le premier pic est atteint plus rapidement pour les portées de faibles longueurs que pour celles de longueurs plus élevées.

En outre, les portées de faibles longueurs montrent une réduction de moment entre le premier et le

second pic plus importante que celle pour des longueurs plus élevées : soit une réduction de 38% pour la portée de 152,4 mètres versus 17% de réduction pour la portée de 457,2 mètre. Cependant, le deuxième pic n'est pas un critère aussi fiable pour déterminer l'intensité de la réponse transitoire. La figure 61 montre bien d'autres pics plus élevés que celui du second pic qui surviennent au cours du temps de calcul, mais qui ne dépassent en aucun cas l'intensité du premier pic.

Les courbes montrant l'influence de la longueur de portée vis-à-vis le nombre de pylônes affectés sont illustrés aux figures 62 à 70 pour les tensions 25, 40 et 60% de RTS et pour les différents lois de comportements.

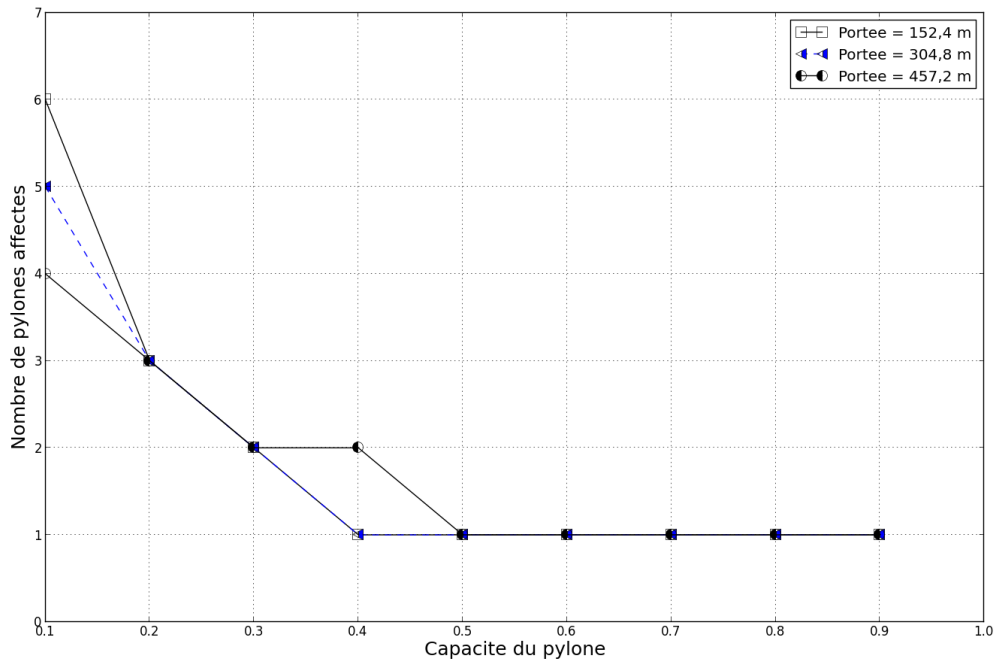


Figure 62-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-25% RTS-Liso=2,1336 m-Comportement élastique

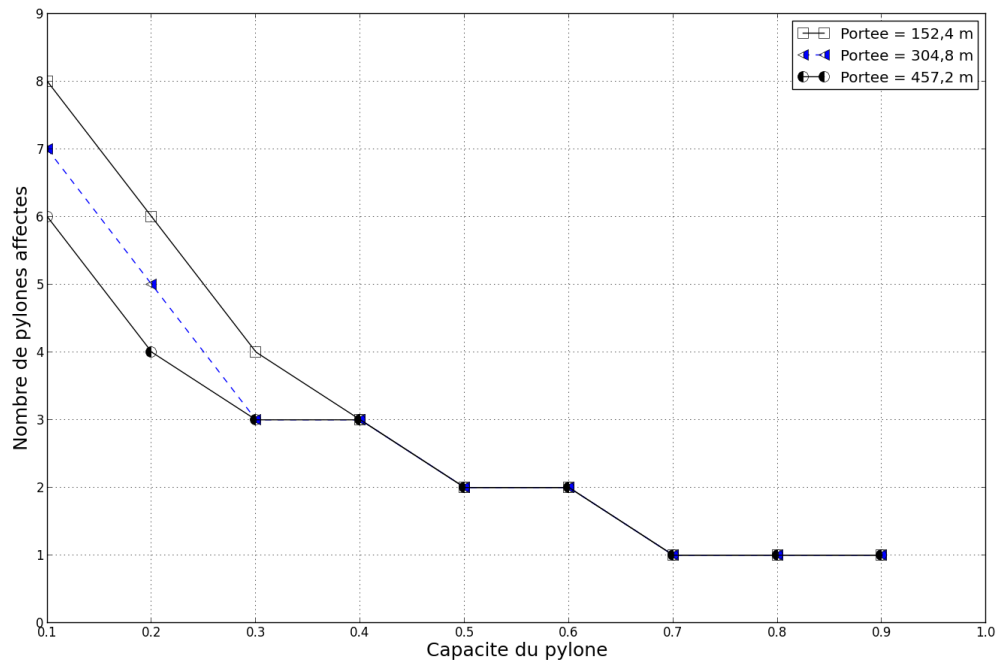


Figure 63-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-40% RTS-Liso=2,1336 m- Comportement élastique

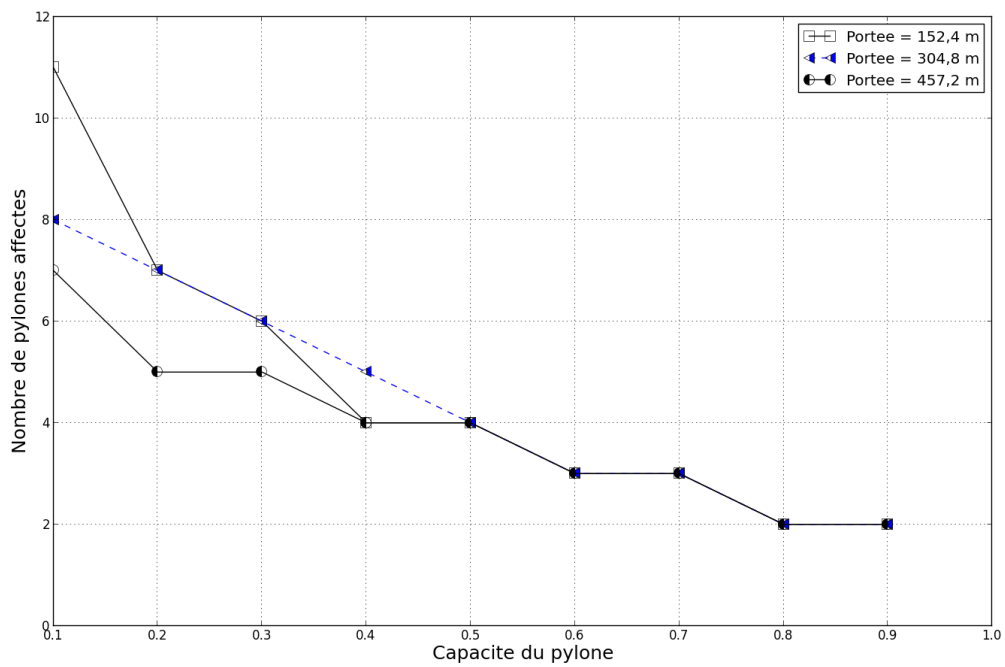


Figure 64-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-60% RTS-Liso=2,1336 m- Comportement élastique

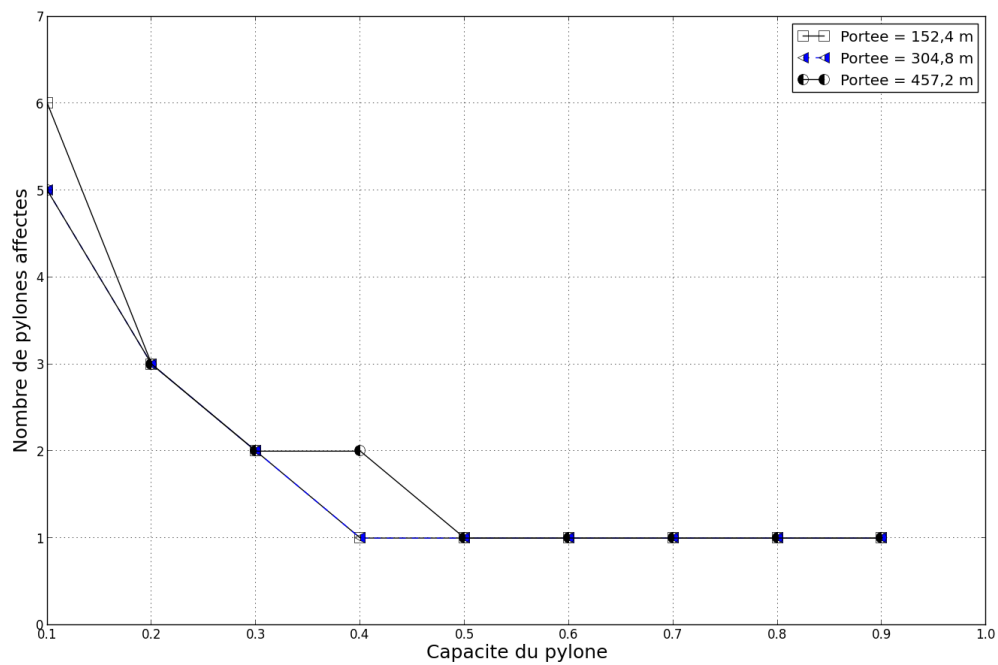


Figure 65-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-25% RTS-Liso=2,1336 m- Comportement élastique parfaitement plastique

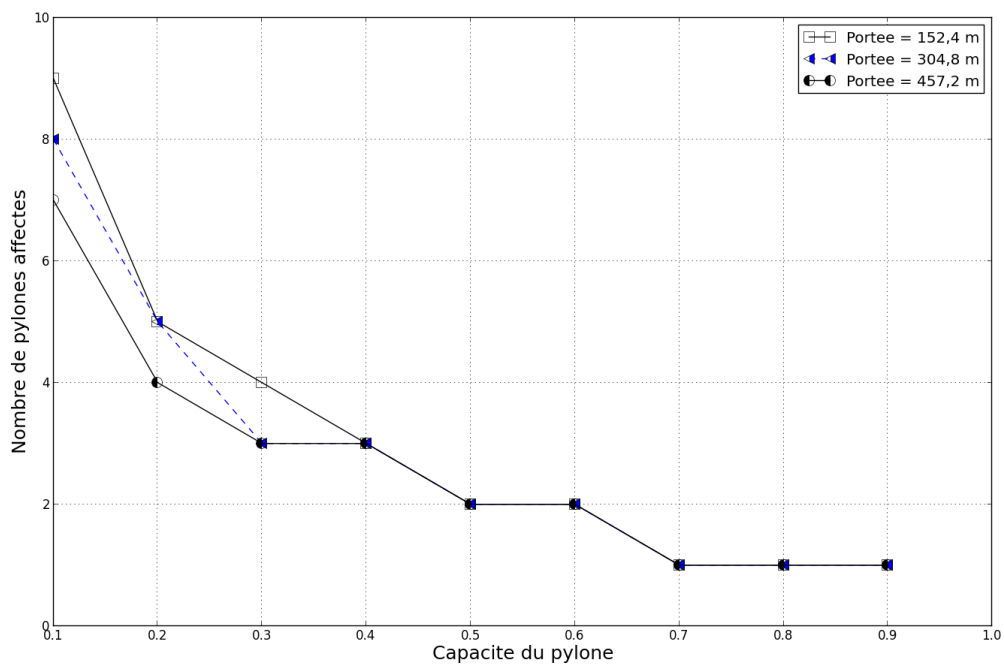


Figure 66-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-40% RTS-Liso=2,1336 m- Comportement élastique parfaitement plastique

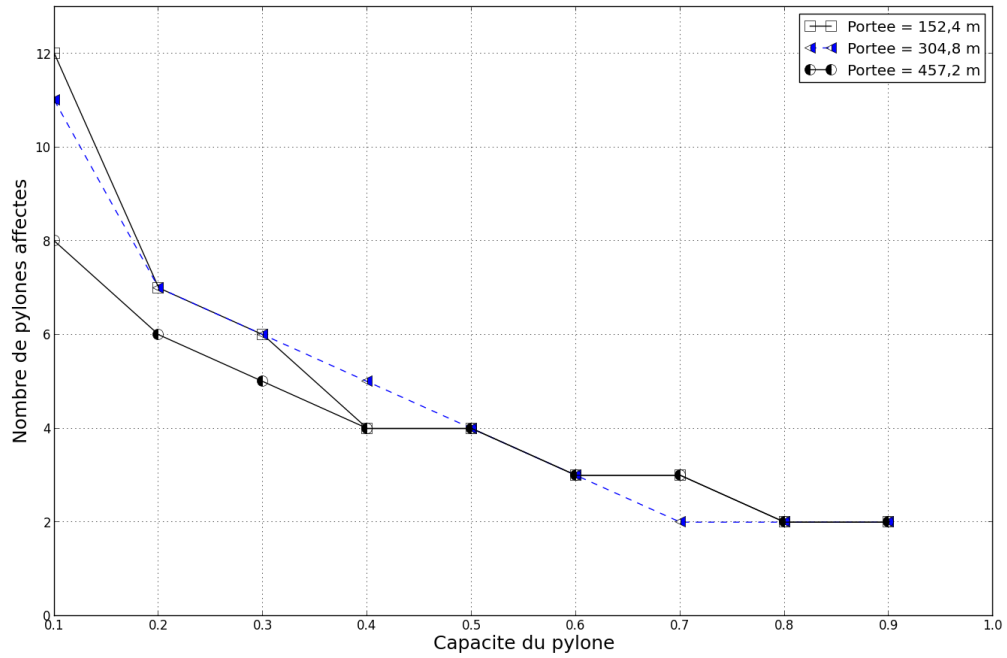


Figure 67-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-60% RTS-Liso=2,1336 m- Comportement élastique parfaitement plastique

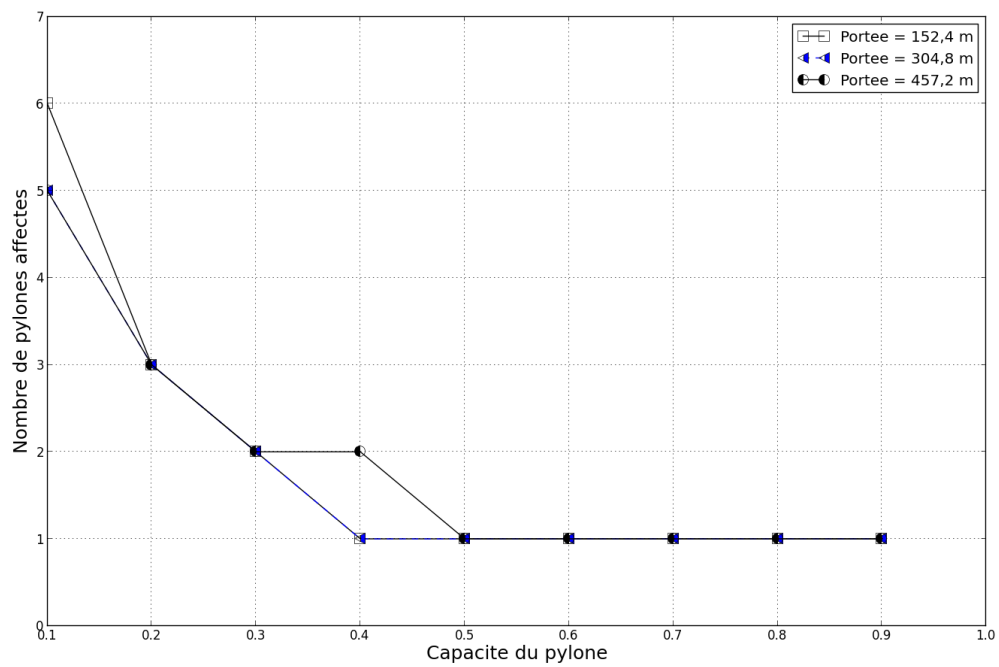


Figure 68-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-25% RTS-Liso=2,1336 m- Comportement élasto plastique bilinéaire



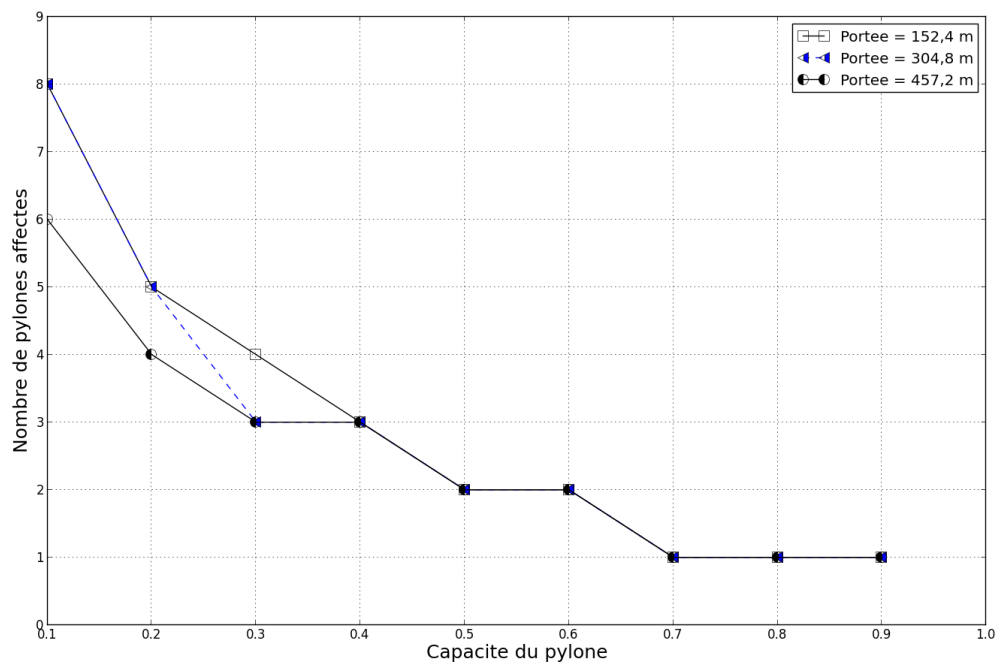


Figure 69-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-40% RTS-Liso=2,1336 m-  
Comportement élasto plastique bilinéaire

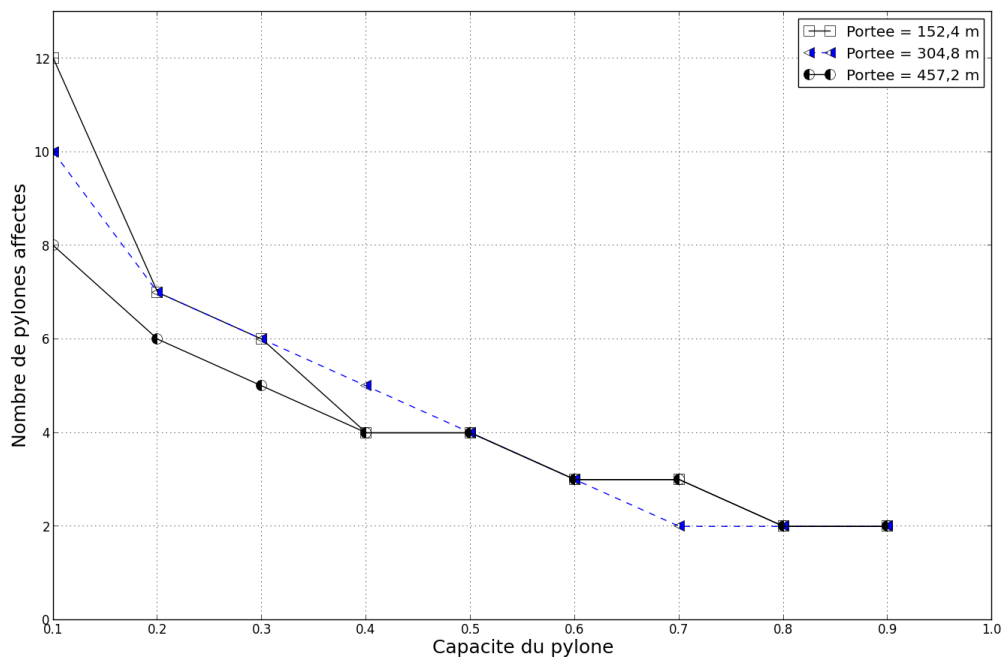


Figure 70-Influence de la longueur de portée sur le nombre de pylône affectés-60% RTS-Liso=2,1336 m-  
Comportement élasto plastique bilinéaire

De façon générale, l'influence de la portée sur l'étendue de la cascade semble relativement faible. Comme prévu, les courbes montrent que les lignes de faibles portées sont plus affectées que celles de grande portée. Ceci concorde avec les résultats de Mozer (1978).

### 7.3. Influence de la loi de comportement

#### 7.3.1. Résultats

Les figures 71 à 73 montrent l'influence de la loi de comportement sur l'étendue de la cascade pour les trois longueurs de portée, alors que les tableaux 16 à 18 donnent le nombre de pylônes affectés pour tous les cas de chargement et toutes les capacités.

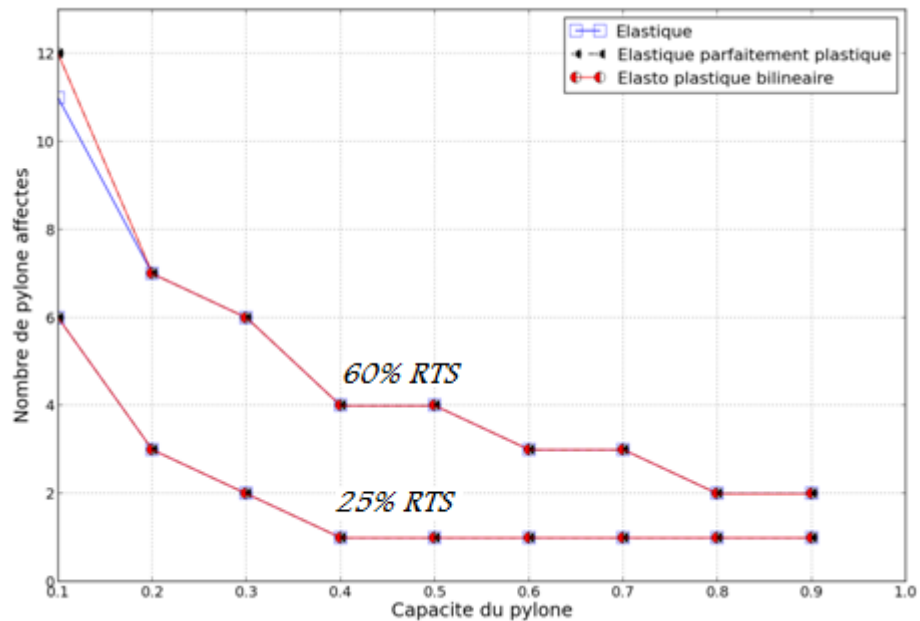


Figure 71-Influence de la loi de comportement sur l'étendue de la cascade-Portée=152,4 m- Liso=2,1336 m

Tableau 16-Influence de la loi de comportement sur le nombre de pylônes plastifiés  
 Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m

Élastique

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
60%	11	7	6	4	4	3	3	2	2
50%	9	7	5	4	3	2	2	2	2
40%	8	6	4	3	2	2	1	1	1
30%	7	4	2	2	1	1	1	1	1
25%	6	3	2	1	1	1	1	1	1

Élastique parfaitement plastique

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
60%	12	7	6	4	4	3	3	2	2
50%	11	7	5	4	3	2	2	2	2
40%	9	5	4	3	2	2	1	1	1
30%	7	4	2	2	1	1	1	1	1
25%	6	3	2	1	1	1	1	1	1

Élasto plastique bilinéaire

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
60%	12	7	6	4	4	3	3	2	2
50%	11	7	5	4	3	2	2	2	2
40%	8	5	4	3	2	2	1	1	1
30%	7	4	2	2	1	1	1	1	1
25%	6	3	2	1	1	1	1	1	1

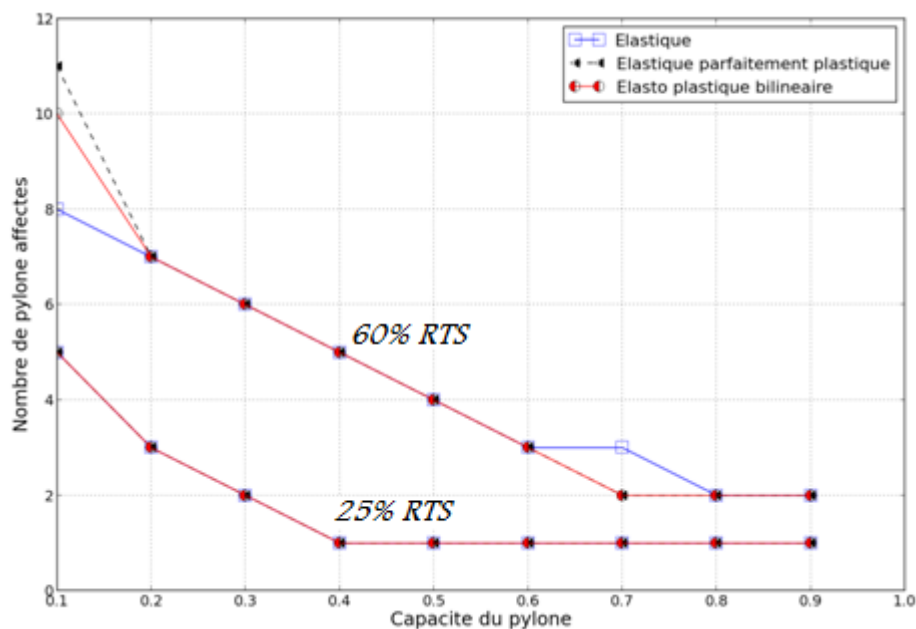


Figure 72-Influence de la loi de comportement sur l'étendue de la cascade-Portée=304,8 m- Liso=2,1336 m

Tableau 17-Influence de la loi de comportement sur le nombre de pylônes plastifiés  
Portée=304,8 m-Liso=2,1336 mÉlastique

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
60%	8	7	6	5	4	3	3	2	2
50%	7	6	5	4	3	2	2	2	1
40%	7	5	3	3	2	2	1	1	1
30%	6	4	2	2	1	1	1	1	1
25%	5	3	2	1	1	1	1	1	1

Élastique parfaitement plastique

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
60%	11	7	6	5	4	3	2	2	2
50%	10	6	5	4	3	2	2	2	1
40%	8	5	3	3	2	2	1	1	1
30%	6	4	2	2	1	1	1	1	1
25%	5	3	2	1	1	1	1	1	1

Élasto plastique bilinéaire

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
60%	10	7	6	5	4	3	2	2	2
50%	10	6	5	4	3	2	2	2	1
40%	8	5	3	3	2	2	1	1	1
30%	6	4	2	2	1	1	1	1	1

25% | 5 3 2 1 1 1 1 1 1

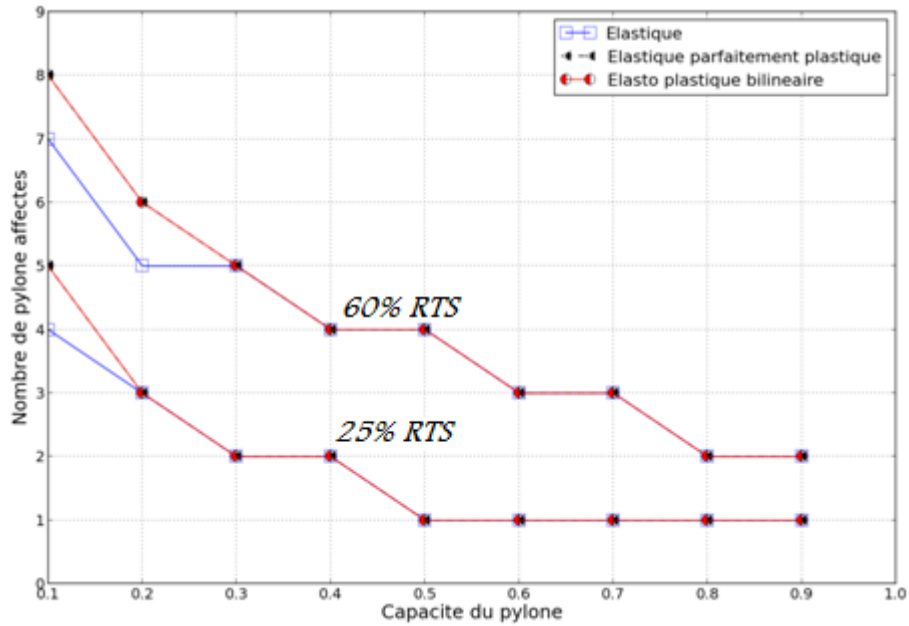


Figure 73-Influence de la loi de comportement sur l'étendue de la cascade-Portée=457,2 m- Liso=2,1336 m

Tableau 18- Influence de la loi de comportement sur le nombre de pylônes plastifiés  
Portée=457,2 m-Liso=2,1336 m

Élastique

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
60%	7	5	5	4	4	3	3	2	2
50%	7	5	4	3	3	2	2	2	2
40%	6	4	3	3	2	2	1	1	1
30%	5	3	2	2	1	1	1	1	1
25%	4	3	2	2	1	1	1	1	1

Élastique parfaitement plastique

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
60%	8	6	5	4	4	3	3	2	2
50%	7	5	4	3	3	2	2	2	2
40%	7	4	3	3	2	2	1	1	1
30%	6	3	2	2	1	1	1	1	1
25%	5	3	2	2	1	1	1	1	1

Élasto plastique bilinéaire

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
60%	8	6	5	4	4	3	3	2	2
50%	7	5	4	3	3	2	2	2	2

40%	6	4	3	3	2	2	1	1	1
30%	6	3	2	2	1	1	1	1	1
25%	5	3	2	2	1	1	1	1	1

### 7.3.2. Observations

Les lois de comportements étudiées ont montré peu de différence vis-à-vis le nombre de pylônes affectés de la ligne soumise aux bris de conducteurs. Pour les différentes longueurs de portées, on a pu constater à partir des courbes présentées ci-dessus qu'au-delà d'une capacité de 30% de la capacité de référence, les lois de comportement n'ont plus d'influence sur l'étendue de la cascade.

Cependant, pour les capacités 10 et 20% de la capacité de référence les courbes montrent que pour la loi de comportement élastique il y a toujours moins de pylônes affectés que pour la loi de comportement élastique parfaitement plastique et la loi bilinéaire. Cependant, pour ces niveaux de résistance, les calculs ne sont pas nécessairement réalistes puisque les déplacements en tête des pylônes deviennent très grands et le comportement à la ruine est modélisé de façon simplifiée.

Ces conclusions seraient différentes si le critère d'endommagement des pylônes était l'atteinte de certain niveau de ductilité. Cette approche permettrait de tirer avantage de la réserve de capacité post-élastique des pylônes.

Malgré le peu de différence entre le nombre de pylônes affectés pour les diverses lois de comportement, la réponse dynamique de la ligne diffère de façon significative selon la loi. Une loi élasto plastique bilinéaire sera utilisée pour la suite parce qu'elle est jugée plus réaliste.

Toutefois, comme montré au tableau 19 dans le cas du chargement 25% RTS, les déplacements en tête du pylône peuvent atteindre plusieurs mètres pour de faibles capacités du pylône. Le tableau 20, montre que ces déplacements sont encore plus grands pour le cas de chargement 75% RTS. Pour ces faibles capacités, une modélisation réaliste demanderait de créer une rupture complète du pylône pour un certain niveau de déformation pour mieux reproduire le comportement dynamique de la ligne. Ce type de modélisation demanderait davantage de développement dans le logiciel Code\_Aster, ce qui ne pouvait pas être réalisé dans le cadre de ce projet. Il faut cependant noter que les efforts maximaux étant transmis très rapidement aux pylônes adjacents, la modélisation du comportement des pylônes après la ruine complète, n'ont probablement pas une influence majeure sur le déroulement de la cascade. Une modélisation plus avancée sera nécessaire pour valider cette hypothèse.

Tableau 19-Déplacement en tête -25% RTS - Liso=2,1336m - Loi élasto plastique bilinéaire.

$\alpha$  0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9

Pylône1	11,24	4,24	2,30	1,58	1,18	0,94	0,78	0,68	0,59
Pylône2	5,59	1,95	1,10	0,70	0,52	0,41	0,33	0,28	0,25
Pylône3	3,62	1,29	0,74	0,50	0,37	0,29	0,23	0,19	0,16
Pylône4	2,63	0,99	0,59	0,40	0,28	0,21	0,17	0,13	0,11
Pylône5	2,06	0,82	0,49	0,32	0,23	0,17	0,13	0,11	0,09
Pylône6	1,68	0,70	0,42	0,28	0,20	0,17	0,12	0,09	0,08
Pylône7	1,40	0,60	0,37	0,25	0,18	0,15	0,11	0,08	0,07
Pylône8	1,17	0,53	0,33	0,23	0,16	0,14	0,10	0,08	0,06
Pylône9	0,98	0,47	0,29	0,20	0,14	0,12	0,09	0,07	0,06
Pylône10	0,84	0,40	0,25	0,17	0,12	0,10	0,08	0,07	0,05
Pylône11	0,72	0,34	0,21	0,14	0,11	0,09	0,08	0,06	0,04
Pylône12	0,61	0,28	0,17	0,12	0,09	0,09	0,08	0,05	0,04
Pylône13	0,50	0,23	0,14	0,10	0,09	0,09	0,06	0,04	0,03
Pylône14	0,38	0,17	0,10	0,07	0,08	0,07	0,05	0,04	0,03
Pylône15	0,25	0,11	0,07	0,05	0,06	0,06	0,04	0,03	0,02
Pylône16	0,13	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01

Tableau 20- Déplacement en tête -75% RTS -Liso=2,1336m – Loi élasto plastique bilinéaire.

$\alpha$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Pylône1	85,76	51,40	29,31	17,74	11,60	8,02	5,72	4,49	3,60
Pylône2	39,43	20,95	10,82	6,49	4,05	2,67	1,84	1,37	1,07
Pylône3	25,89	11,63	5,64	3,09	1,89	1,27	0,90	0,72	0,61
Pylône4	18,75	7,37	3,13	1,75	1,08	0,77	0,61	0,50	0,42
Pylône5	14,21	4,93	1,95	1,11	0,75	0,56	0,44	0,35	0,30
Pylône6	11,06	3,34	1,32	0,81	0,62	0,49	0,40	0,33	0,27
Pylône7	8,74	2,29	1,02	0,75	0,57	0,45	0,36	0,30	0,25
Pylône8	6,94	1,65	0,94	0,69	0,52	0,41	0,32	0,27	0,22
Pylône9	5,48	1,29	0,86	0,62	0,46	0,36	0,28	0,23	0,19
Pylône10	4,29	1,14	0,78	0,55	0,40	0,31	0,25	0,20	0,17
Pylône11	3,39	1,03	0,68	0,47	0,35	0,27	0,22	0,18	0,15
Pylône12	2,67	0,92	0,59	0,41	0,30	0,24	0,19	0,16	0,13
Pylône13	2,07	0,79	0,51	0,41	0,36	0,29	0,23	0,18	0,15
Pylône14	1,54	0,67	0,42	0,38	0,34	0,29	0,25	0,22	0,18
Pylône15	1,02	0,55	0,42	0,35	0,29	0,24	0,25	0,19	0,17

Pylône16 0,53 0,36 0,30 0,23 0,19 0,15 0,13 0,12 0,11

#### 7.4. Influence de la longueur des chaînes d'isolateurs



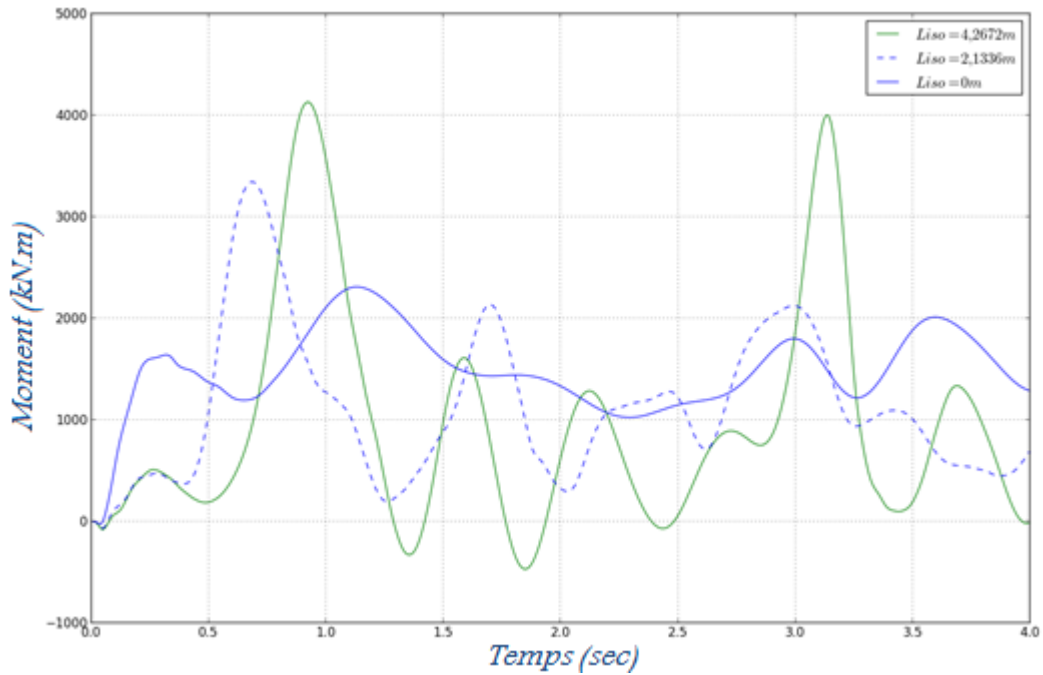


Figure 74-Moments élastique à la base du pylône adjacent aux points de bris pour les différentes longueurs d'isolateurs-Portée=152,4m-Tension=25%RTS

Étant donné que la liaison entre les chaînes d'isolateurs et les supports est une rotule, alors on s'attendait à ce que la réponse dynamique soit indépendante de la longueur des chaînes d'isolateurs. Or la figure précédente l'infirme. On observe que pour une même configuration de ligne la réponse dynamique lors d'un bris de câbles dépend de la longueur des chaînes d'isolateurs.

#### 7.4.1. Résultats

Les figures 75 à 90 montrent l'influence de la longueur de la chaîne d'isolateurs pour diverses longueur de portées et niveaux de tension.

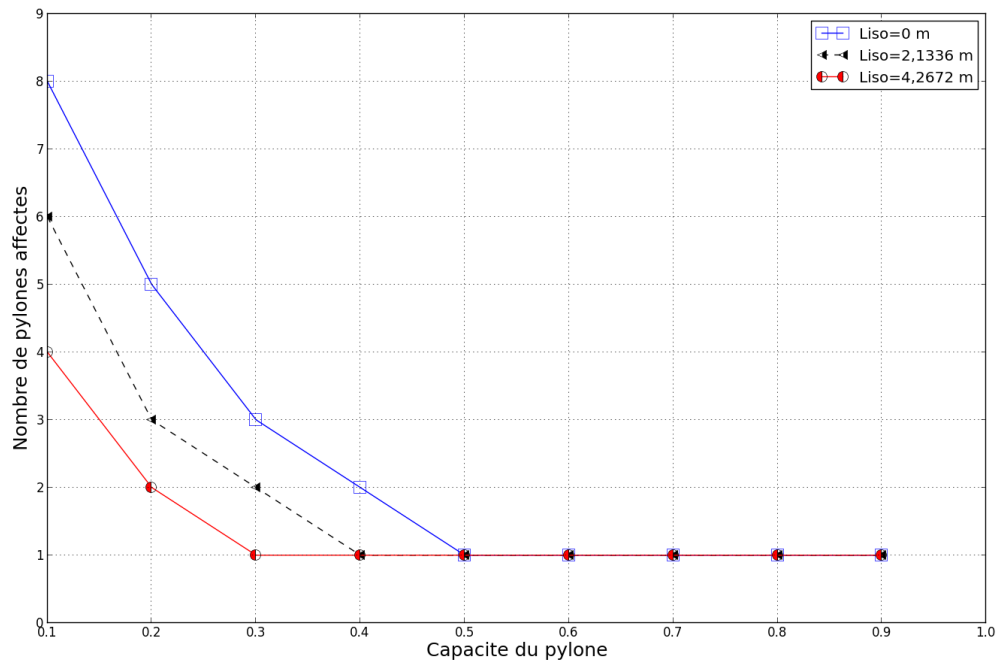


Figure 75-Tension 25% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

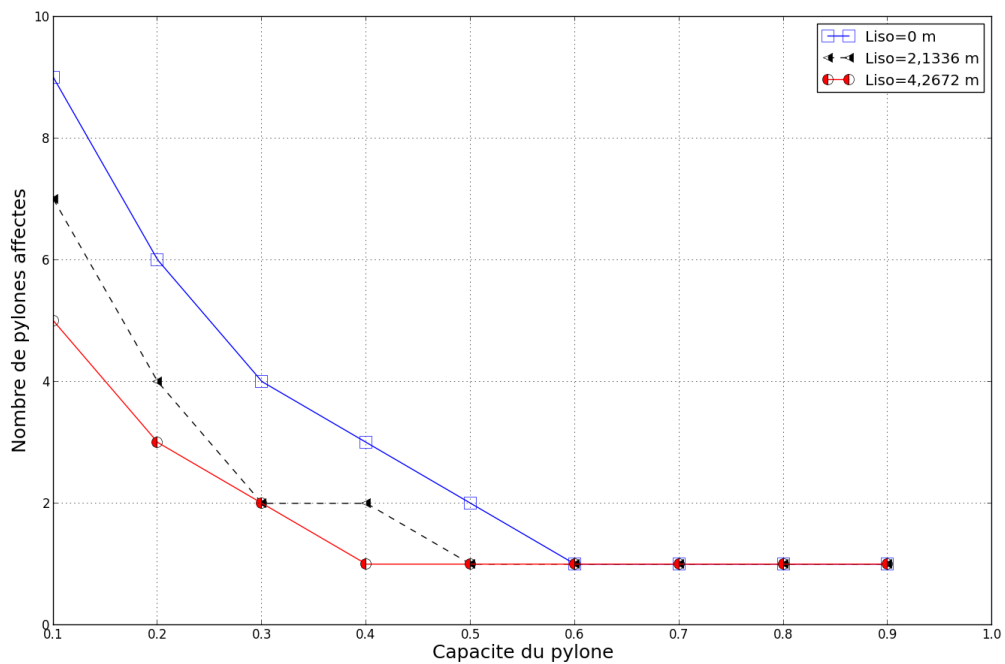


Figure 76-Tension 30% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

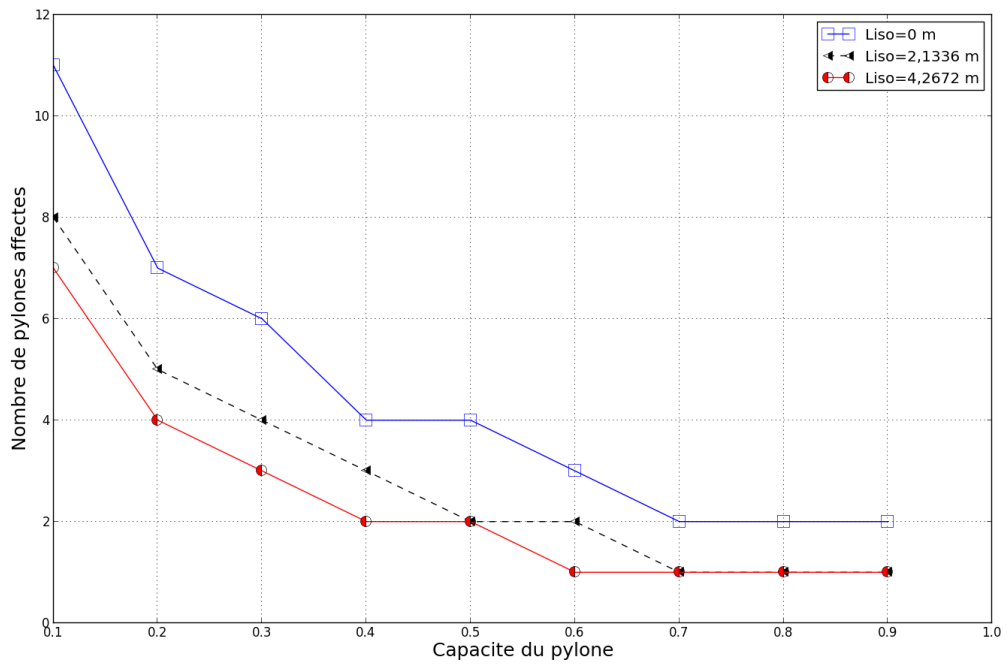


Figure 77-Tension 40% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

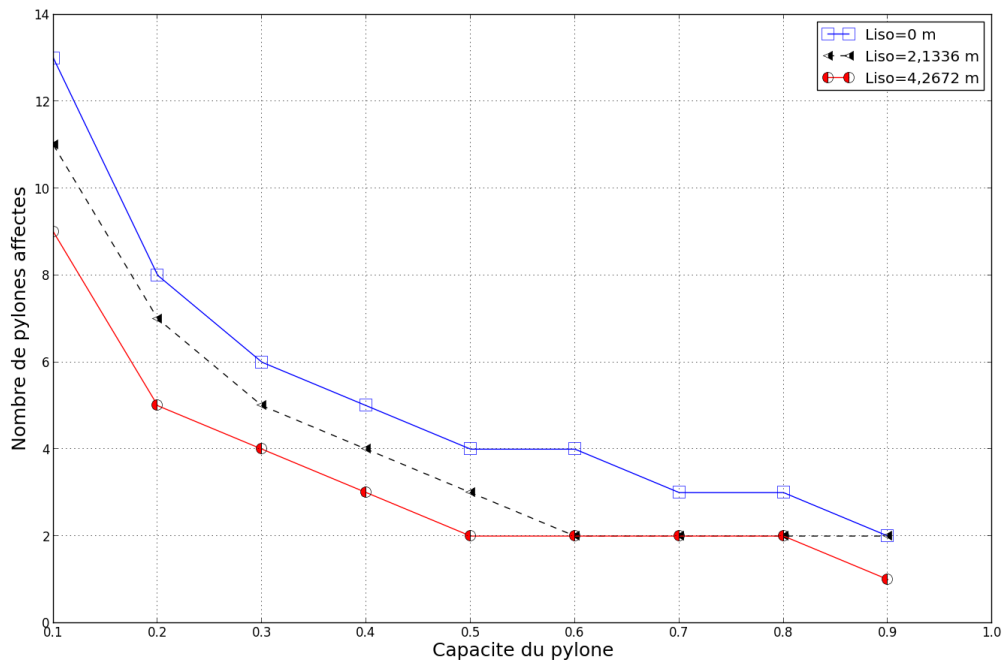


Figure 78-Tension 50% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

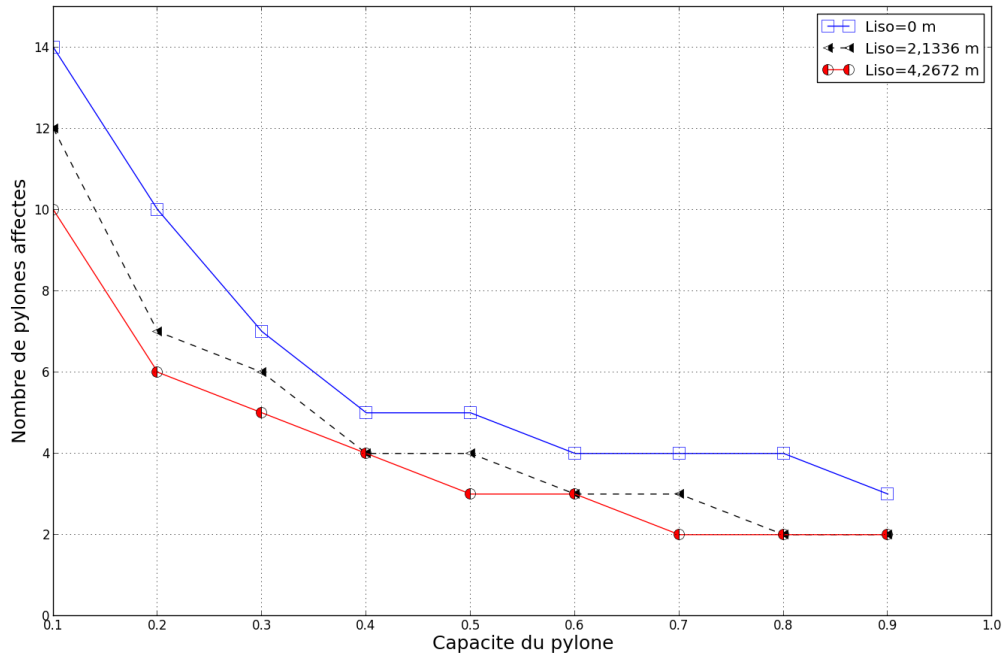


Figure 79-Tension 60% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

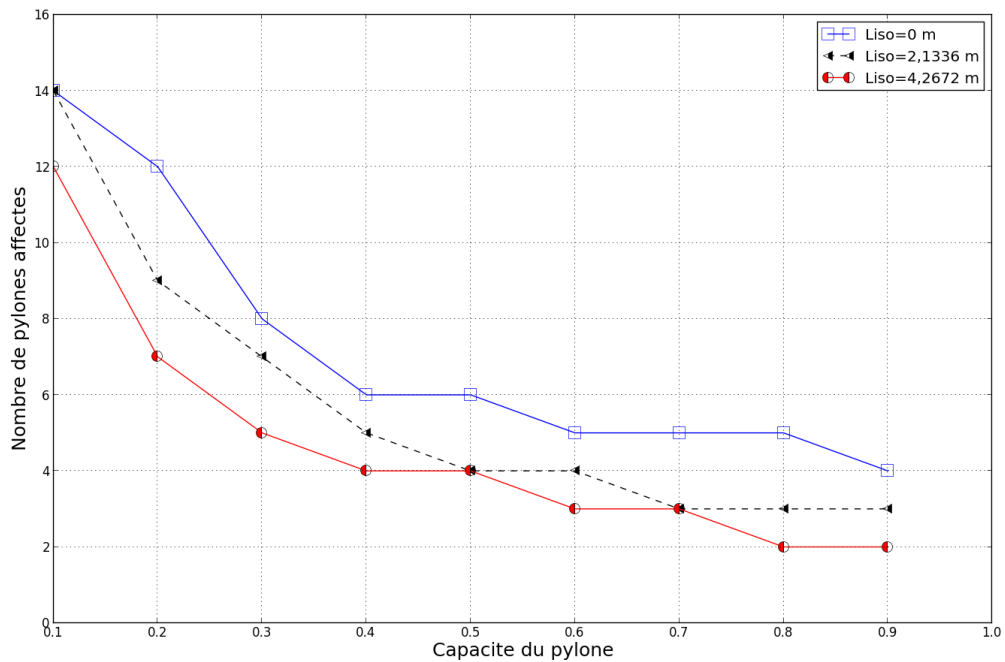


Figure 80-Tension 75% RTS-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

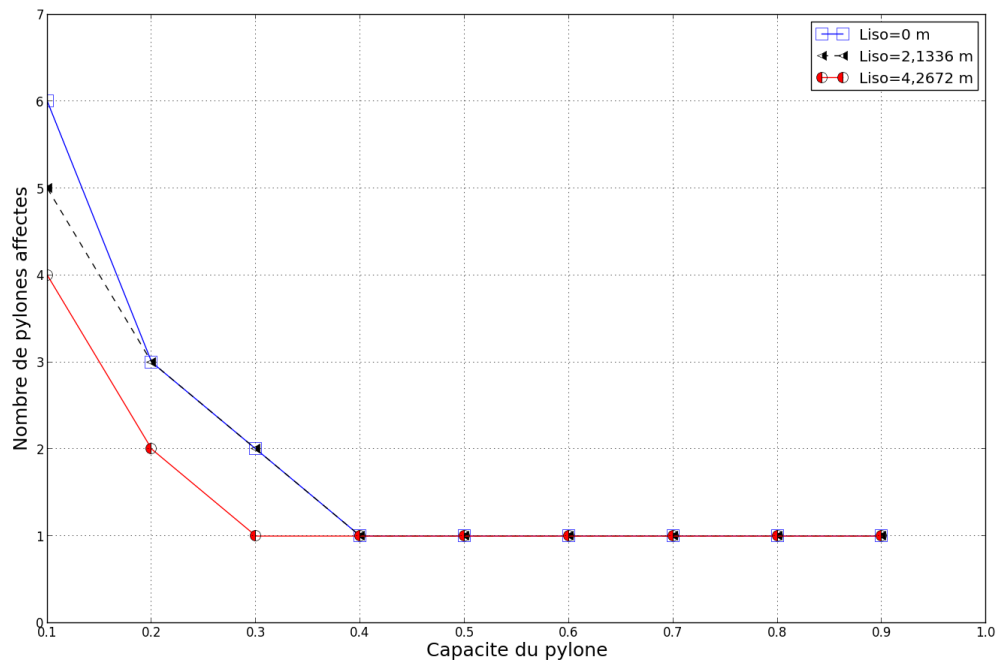


Figure 81-Tension 25% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire

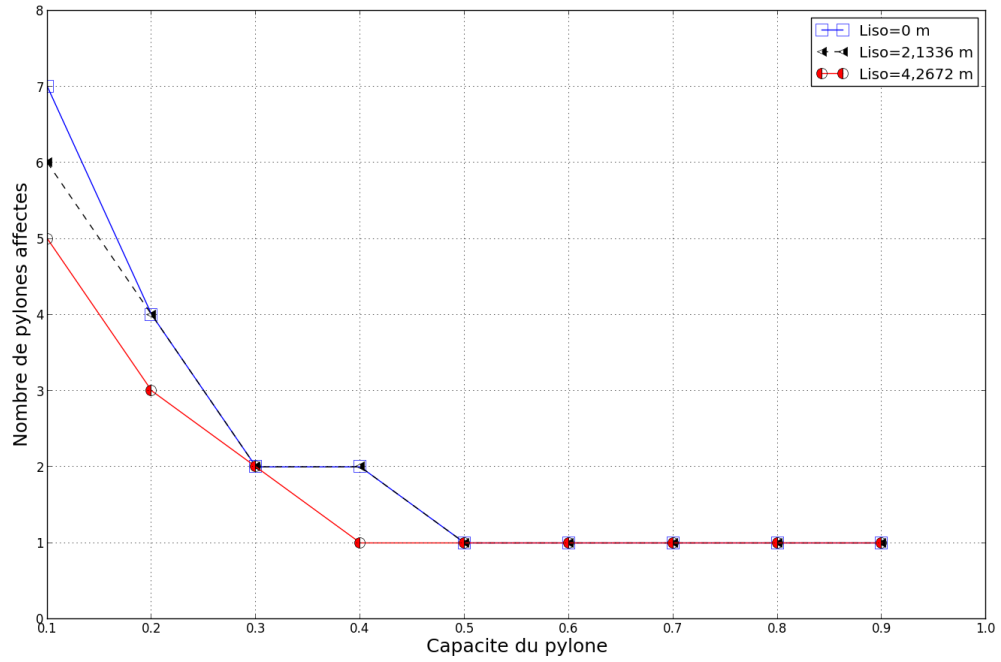


Figure 82-Tension 30% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire

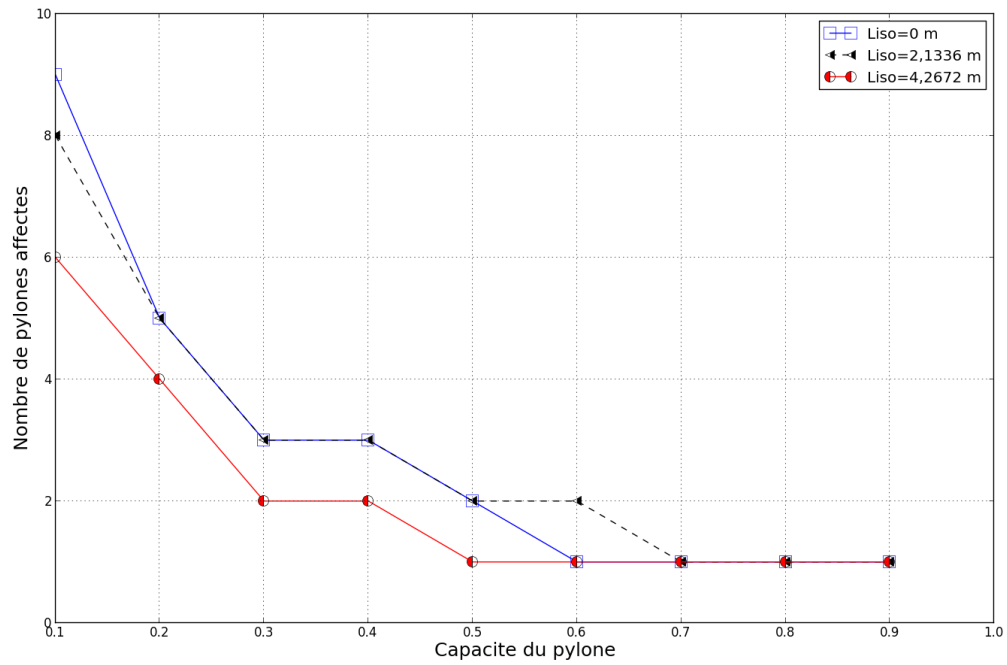


Figure 83-Tension 40% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire

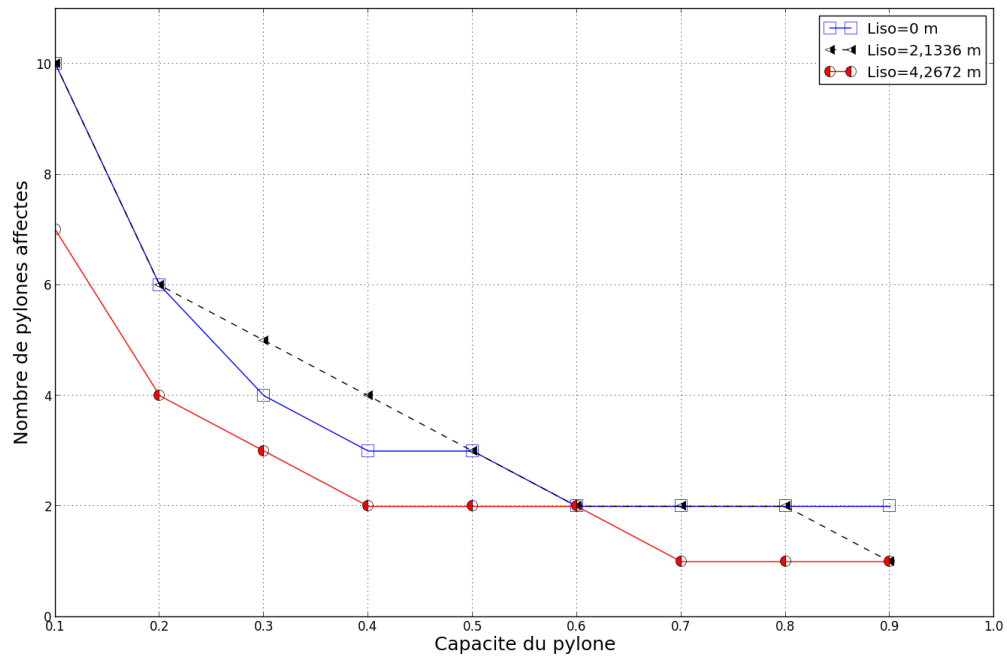


Figure 84-Tension 50% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire

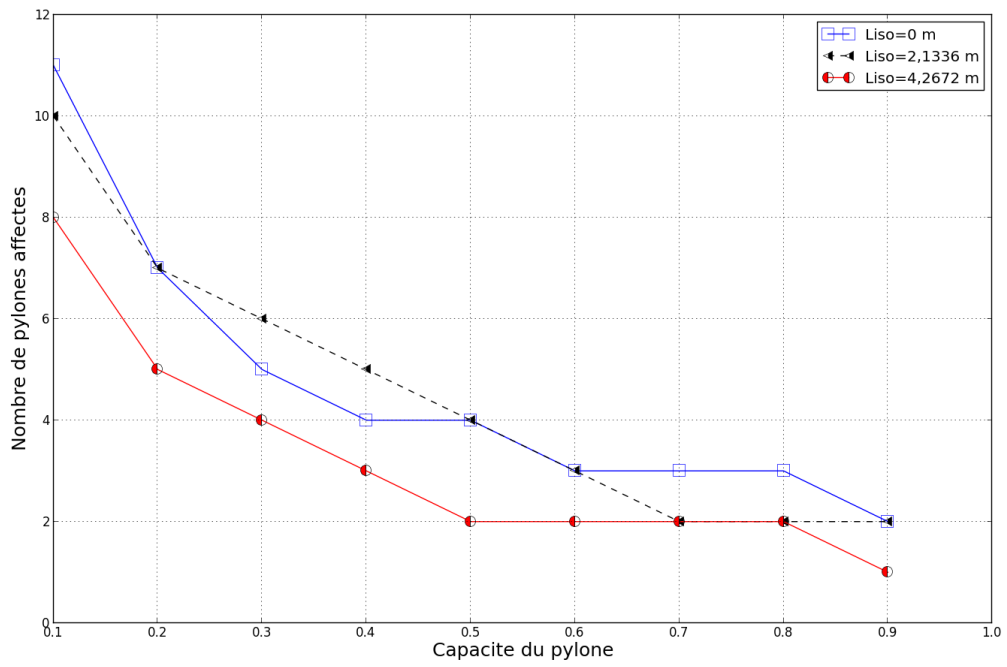


Figure 85-Tension 60% RTS-Portée=304,8 m- Comportement élasto plastique bilinéaire

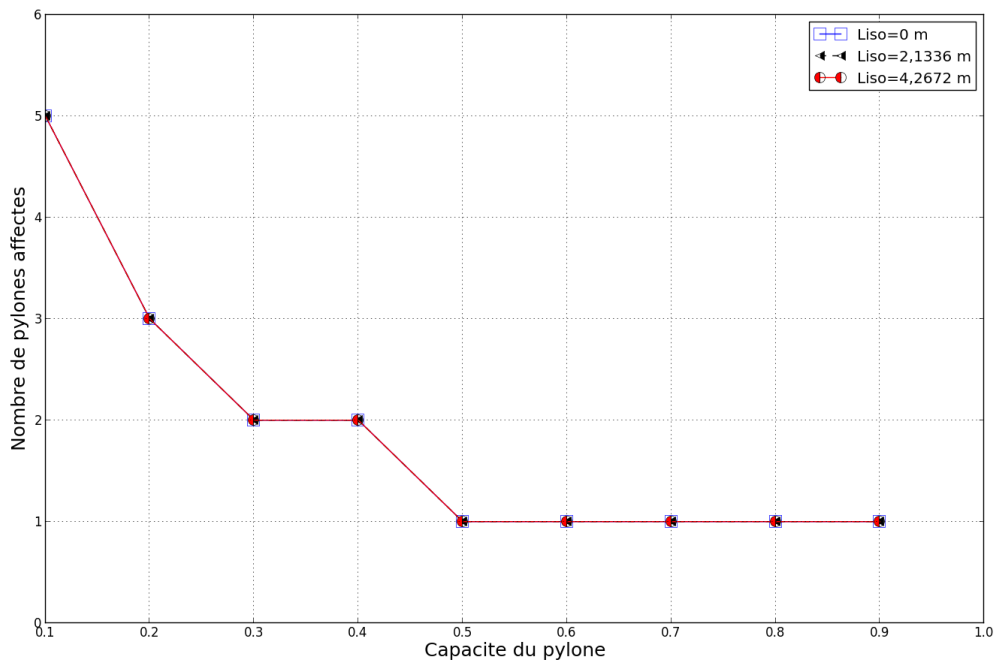


Figure 86-Tension 25% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire

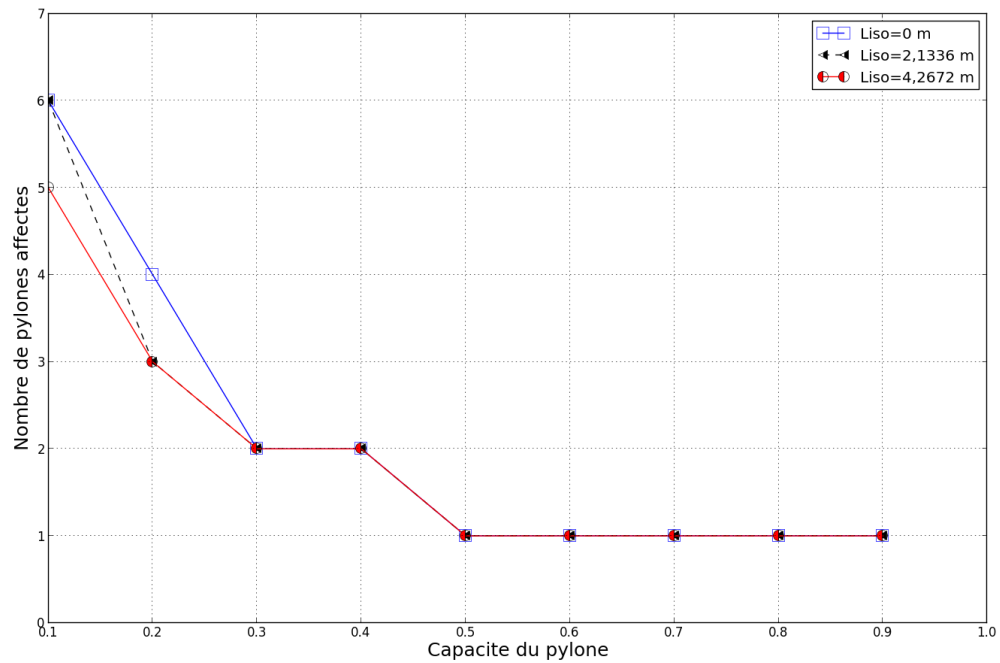


Figure 87-Tension 30% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire

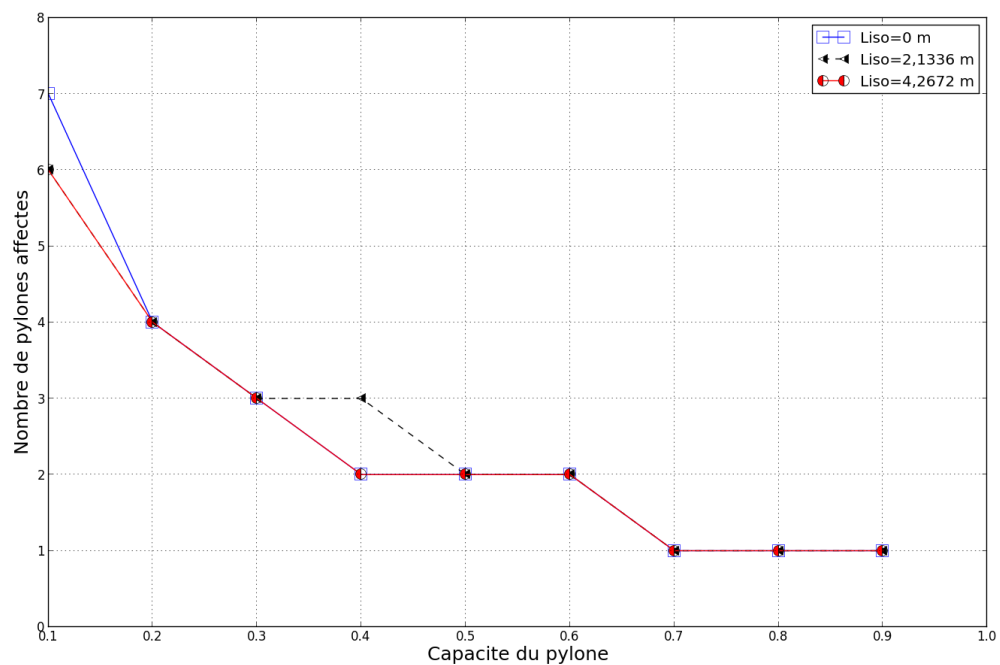


Figure 88-Tension 40% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire



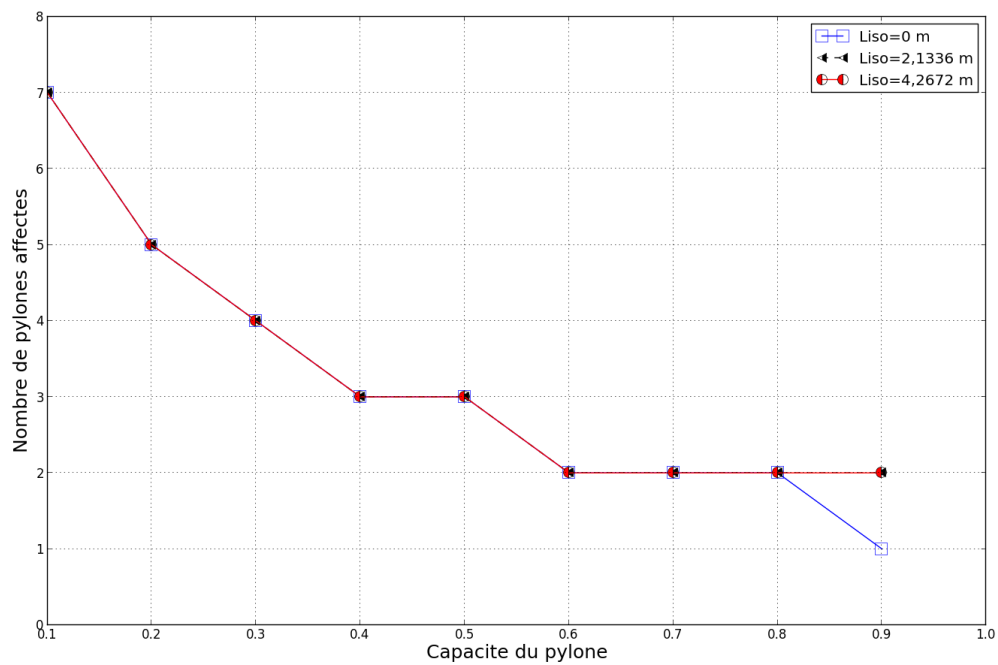


Figure 89-Tension 50% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire

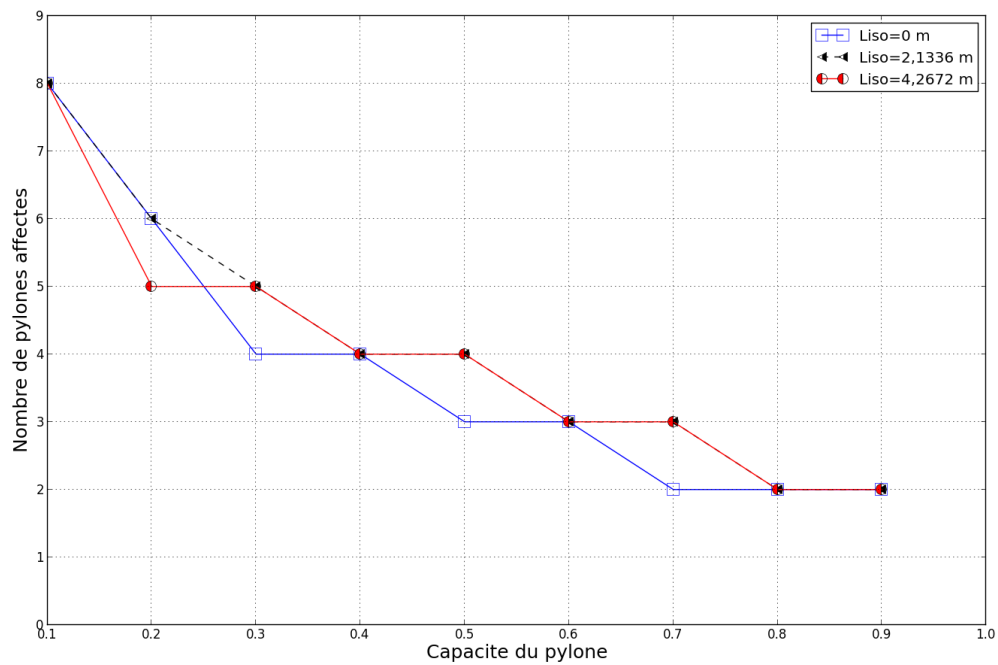
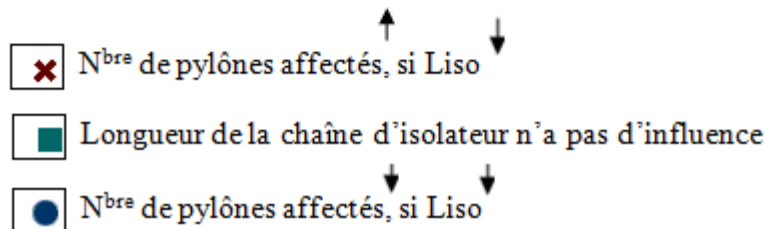


Figure 90-Tension 60% RTS-Portée=457,2 m- Comportement élasto plastique bilinéaire

## 7.4.2. Observations

Tableau 21-Influence de la longueur des chaînes d'isolateurs vis-à-vis les autres paramètres d'études sur l'étendue de la cascade

% RTS		Portée= 152,4						Portée=304,8					Portée=457,2				
		25%	30%	40%	50%	60%	75%	25%	30%	40%	50%	60%	25%	30%	40%	50%	60%
Capacité des pylônes	0,1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	■	×	×	■	■
	0,2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	■	×	■	■	×
	0,3	×	×	×	×	×	×	×	■	×	●	●	■	■	■	■	●
	0,4	×	×	×	×	×	×	■	×	×	●	●	■	■	●	■	■
	0,5	■	×	×	×	×	×	■	■	×	×	×	■	■	■	■	●
	0,6	■	■	×	×	×	×	■	■	●	■	×	■	■	■	■	■
	0,7	■	■	×	×	×	×	■	■	■	×	×	■	■	■	■	●
	0,8	■	■	■	×	×	×	■	■	■	×	×	■	■	■	■	■
	0,9	■	■	■	×	×	×	■	■	■	×	×	■	■	■	●	■



Tel qu'observé au tableau 21, l'étendue de la cascade est nettement influencée par la longueur des chaînes d'isolateurs, sauf que cette dernière est en forte relation avec la longueur des portées, la capacité des pylônes et la tension des câbles.

En effet, le tableau précédent montre que l'importance de l'influence de la longueur des chaînes d'isolateur est inversement proportionnelle à la longueur des portées et que cette influence est d'autant plus importante lorsque la tension des câbles est plus élevée. De façon générale, la tendance est que le nombre de pylônes affectés augmente lorsque la longueur d'isolateur diminue (tableau 21). Cependant, en particulier pour les longueurs de portée plus grande il y a plusieurs exceptions à cette règle.

En outre, l'utilisation de pylônes de forte capacité (au-delà de 50% de la capacité de référence) réduit considérablement la contribution de la longueur des chaînes d'isolateurs à la réponse dynamique de la ligne surtout pour de faibles tensions dans les câbles.

En conclusion, les courbes montrent que le choix de la longueur d'isolateur contribue largement la réponse dynamique du canton, mais que l'effet de la longueur des chaînes d'isolateurs reste conditionné par les autres paramètres de la ligne.

## CHAPITRE VI. CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif la modélisation numérique à l'aide du logiciel Code\_Aster d'un canton de ligne composé de pylônes tubulaires soumis à un bris de câble et l'étude du nombre de pylônes affectés en fonction de la capacité à la conception de pylônes.

Cette étude a été précédée par une validation préliminaire d'un essai à échelle réduite tiré de la littérature. Le but principal est de valider le modèle par éléments finis qui sera adopté pour la suite du projet. L'utilisation des éléments poutre de Timoshenko en multifibre et d'une loi de comportement élasto plastique a été validée avec un modèle simple d'une poutre en porte-à-faux. Ensuite la modélisation d'un canton de pylône tubulaire a été mise en place et une analyse dynamique non linéaire (non linéarités géométrique et matériau) a été faite pour le bris de tous les câbles au premier pylône d'alignement du canton. Une étude paramétrique a été réalisée pour étudier l'effet de la longueur de portée

Les conclusions principales de l'étude sont :

- Comme prévu, le nombre de pylônes affectés augmente lorsque la capacité des pylônes diminue.
- Le nombre de pylônes affectés augmente lorsque la tension dans les câbles augmente.
- Le nombre de pylônes affectés est légèrement plus élevé pour les lignes de faibles portées que pour les lignes de grandes portées.
- Les différentes lois de comportements étudiées n'ont pas une influence significative sur le nombre de pylônes affectés.
- La longueur des chaînes d'isolateurs a moins d'influence sur l'étendue de la cascade pour les lignes de longues portées.
- Le nombre de pylônes affectés est d'autant plus accentué pour les cantons ayant une faible longueur de portée et une faible longueur des chaînes de suspensions.
- Les courbes Nombre de pylônes affectés versus Capacité du pylône permettent de choisir un niveau de capacité à atteindre pour respecter un critère pour le nombre de pylônes affectés par une cascade.

Cette étude démontre qu'il est possible pour un concepteur de lignes de transport de concevoir les pylônes de la ligne avec une capacité de pylônes inférieure à ceux correspondants aux charges longitudinales maximales anticipées en tolérant un certain nombre de pylônes pouvant être endommagés. Cette étude a été faite sur un nombre limité de configurations et pour une ligne de

pylônes tubulaires monopodes seulement. Il serait intéressant d'appliquer ce type de modélisation à d'autres configurations géométriques et en particulier à d'autres types de pylônes tubulaires et à treillis. D'autre part, le critère d'endommagement sélectionné ici est simplement l'atteinte de la contrainte élastique limite de la structure. Le même type d'étude pourrait être fait avec un critère d'endommagement basé sur un niveau de ductilité limite, ce qui permettrait de profiter de la capacité post-élastique des pylônes. En somme, pour utiliser ce genre d'approche, le concepteur doit d'abord définir : le critère d'endommagement des pylônes, le critère pour le nombre de pylônes affectés, le cas de chargement des conducteurs à considérer lors du bris et finalement le nombre de conducteurs brisés simultanément.

# 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 - Résultats des tests E de Mozer [Mozer, 1978]

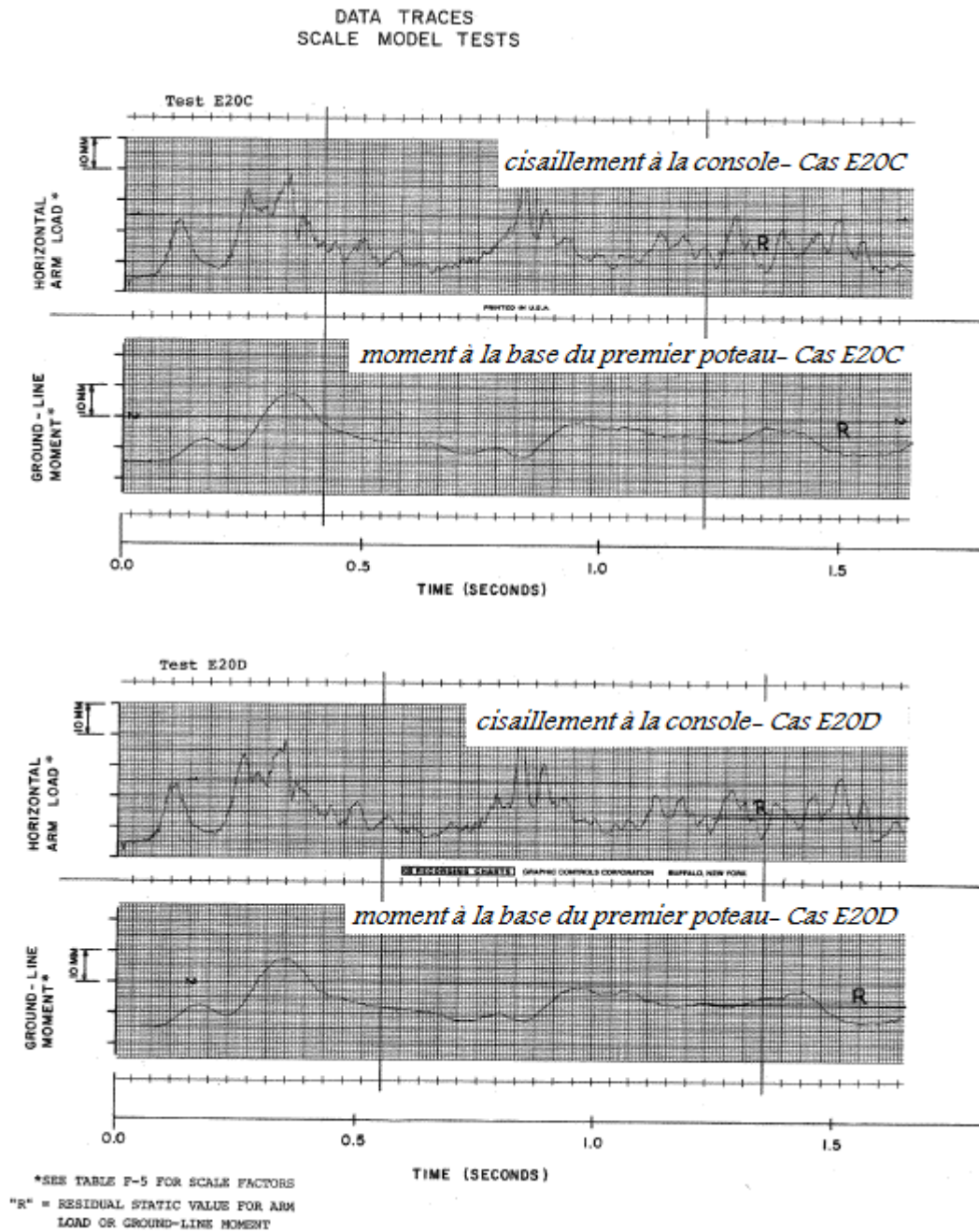


Figure A.2-Réponse dynamique série E- Cas E20C et E20D  
[Mozer, 1978]

# Annexe B

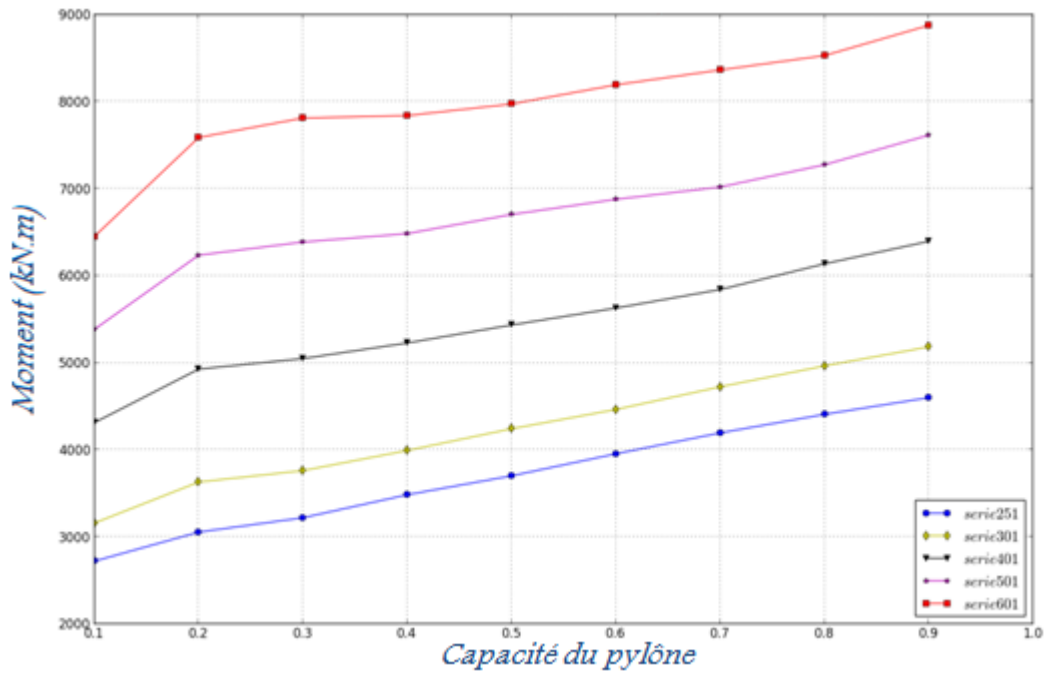


Figure B.1-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique-  
Portée=304,8 m- Liso=2,1336m

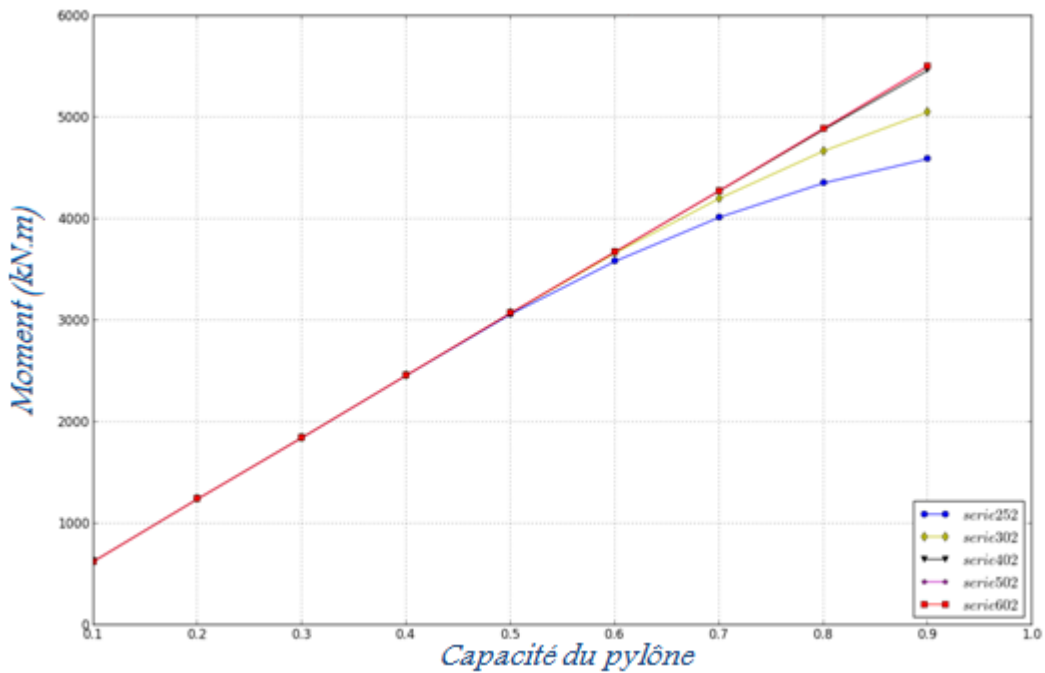


Figure B.2-Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique parfaitement  
plastique-Portée=304,8 m- Liso=2,1336m

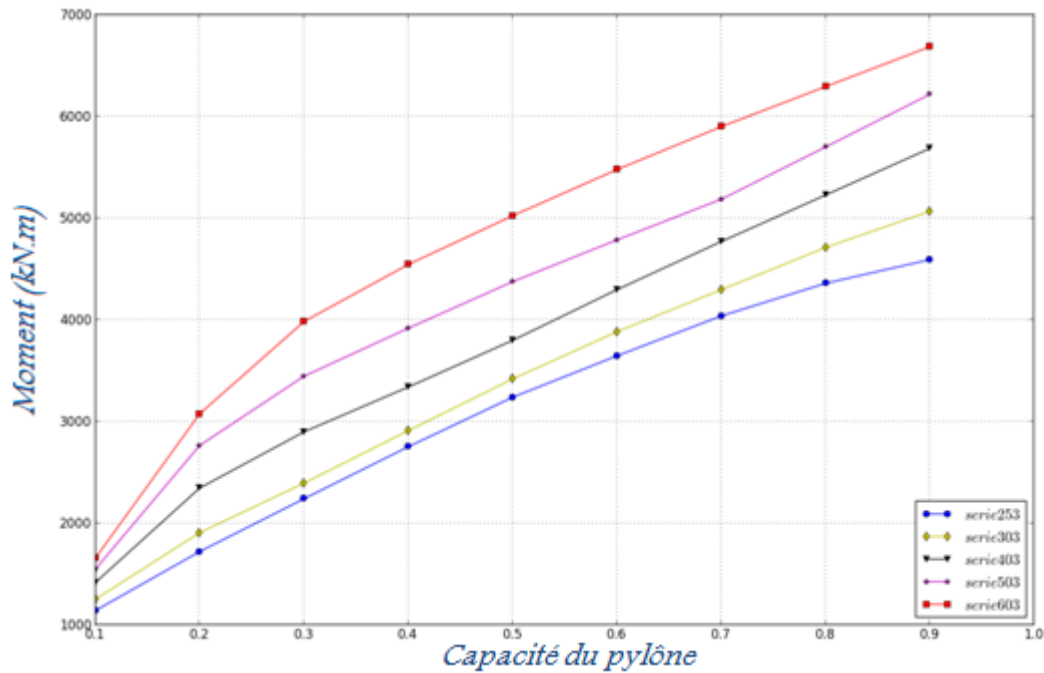


Figure B.3 -Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=304,8 m- Liso=2,1336m

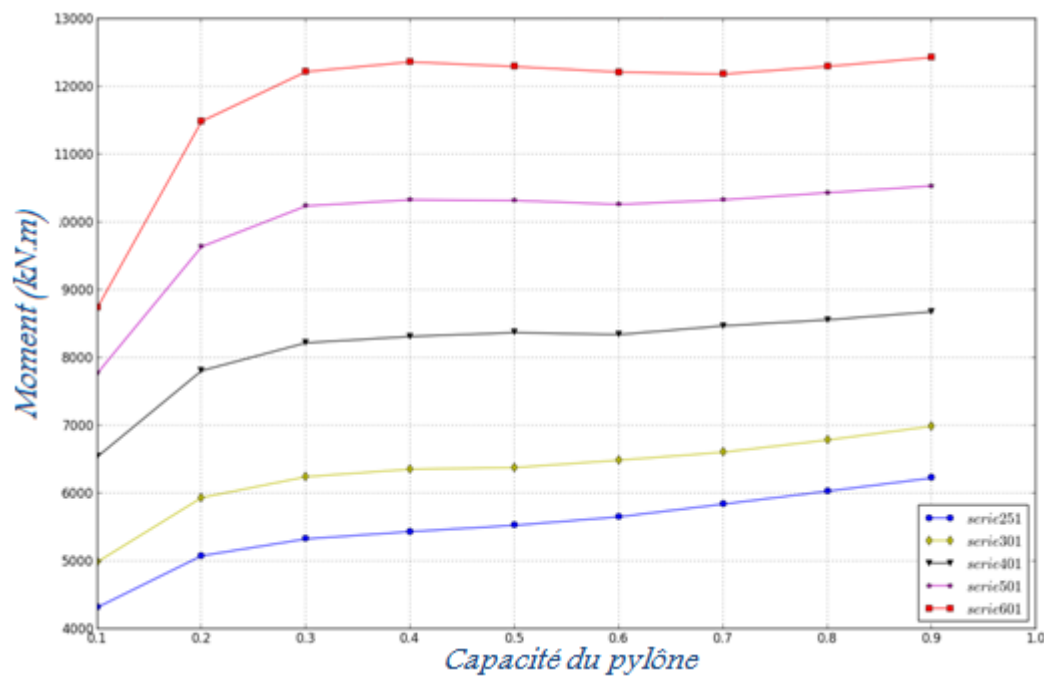


Figure B.4 -Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique-Portée=457,2 m- Liso=2,1336m



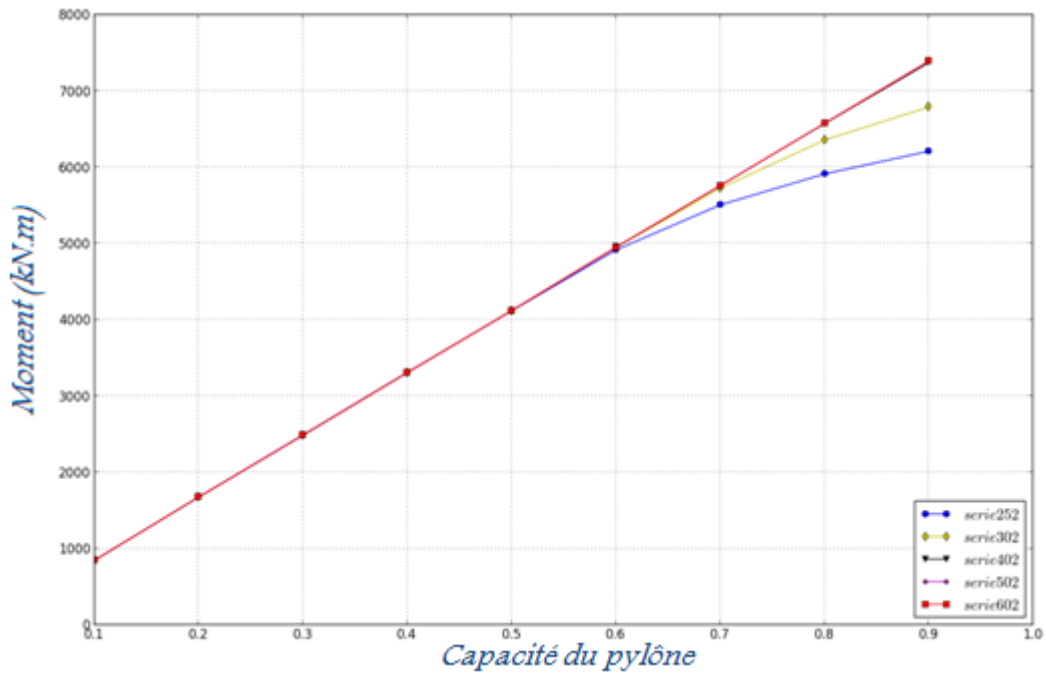


Figure B.5 -Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=457,2 m- Liso=2,1336m

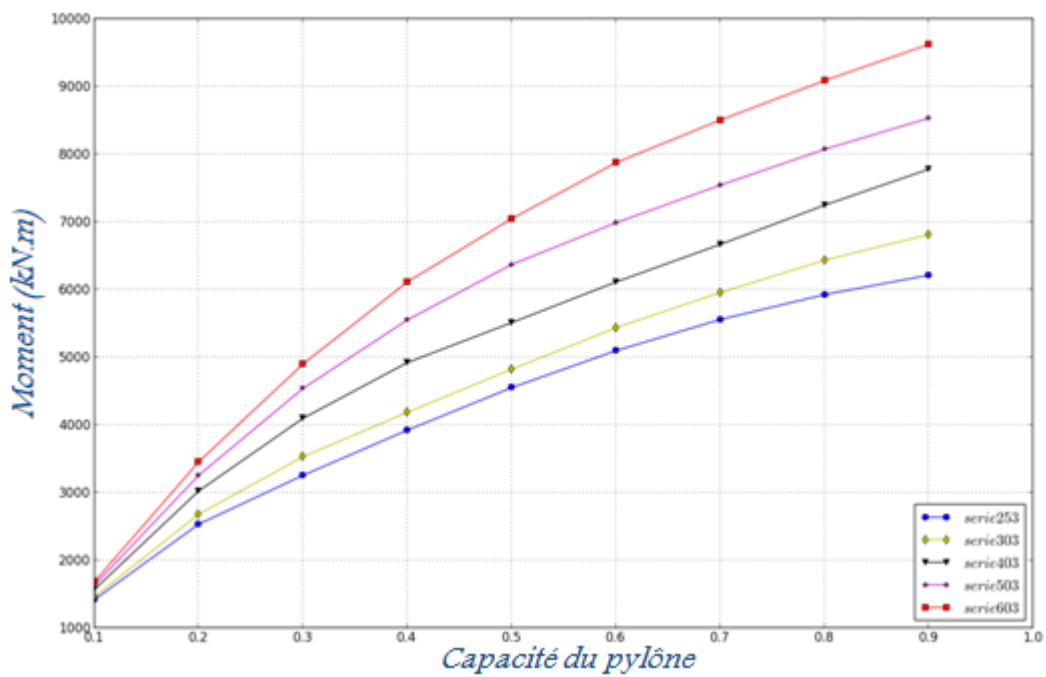


Figure B.6 -Moment maximum à la base du pylône adjacent aux points de bris- Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=457,2 m- Liso=2,1336m

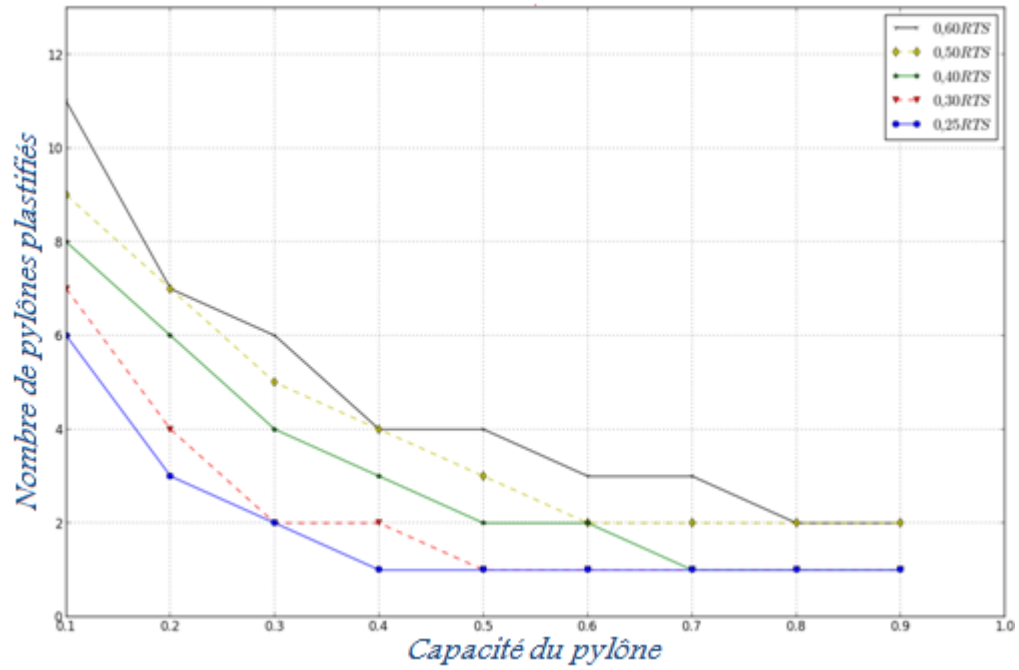


Figure B.7 -Comportement élastique-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m

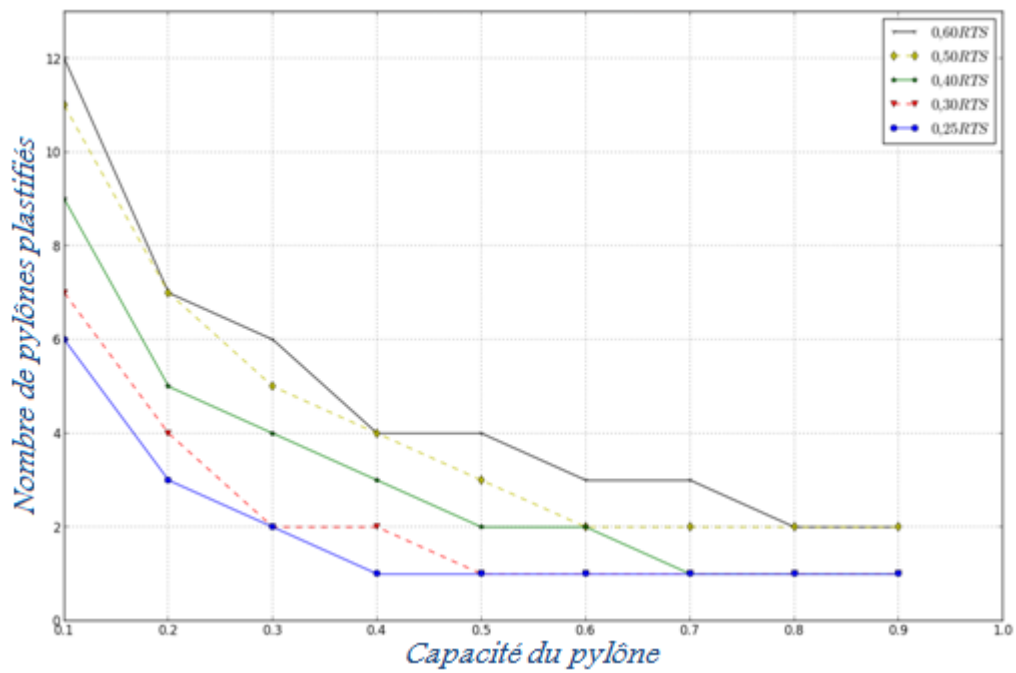


Figure B.8 -Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m

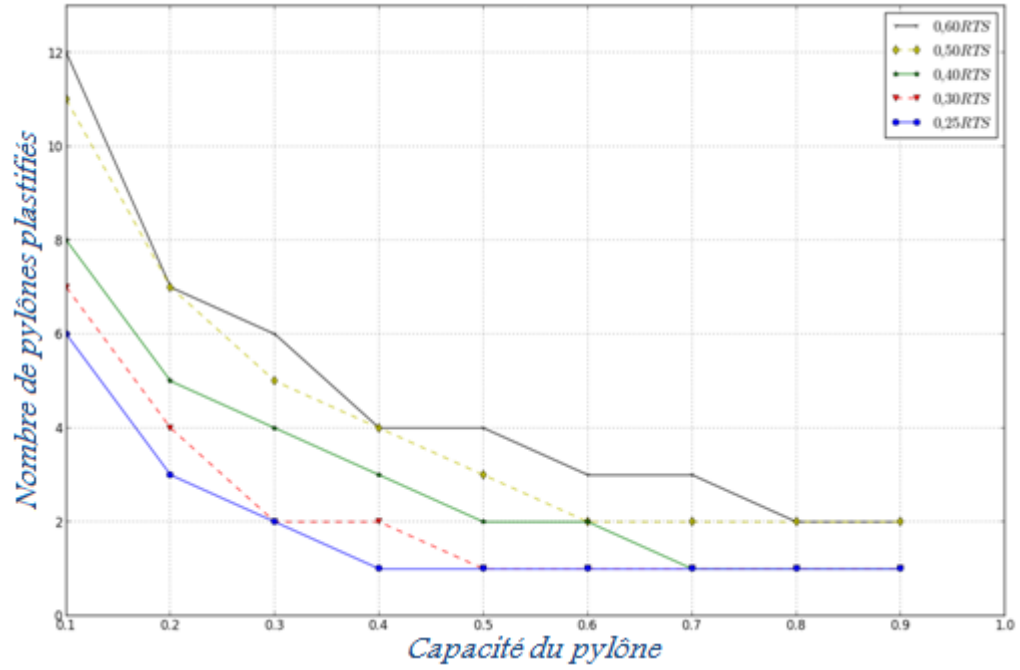


Figure B.9 -Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=152,4 m-Liso=2,1336 m

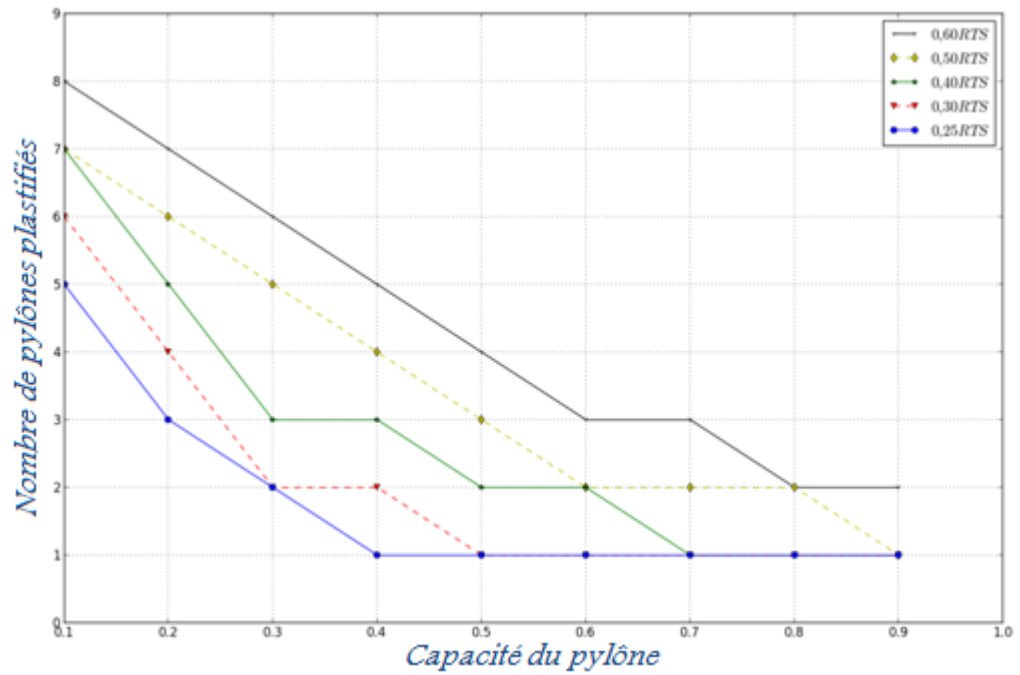


Figure B.10 -Comportement élastique-Portée=304,8 m-Liso=2,1336 m

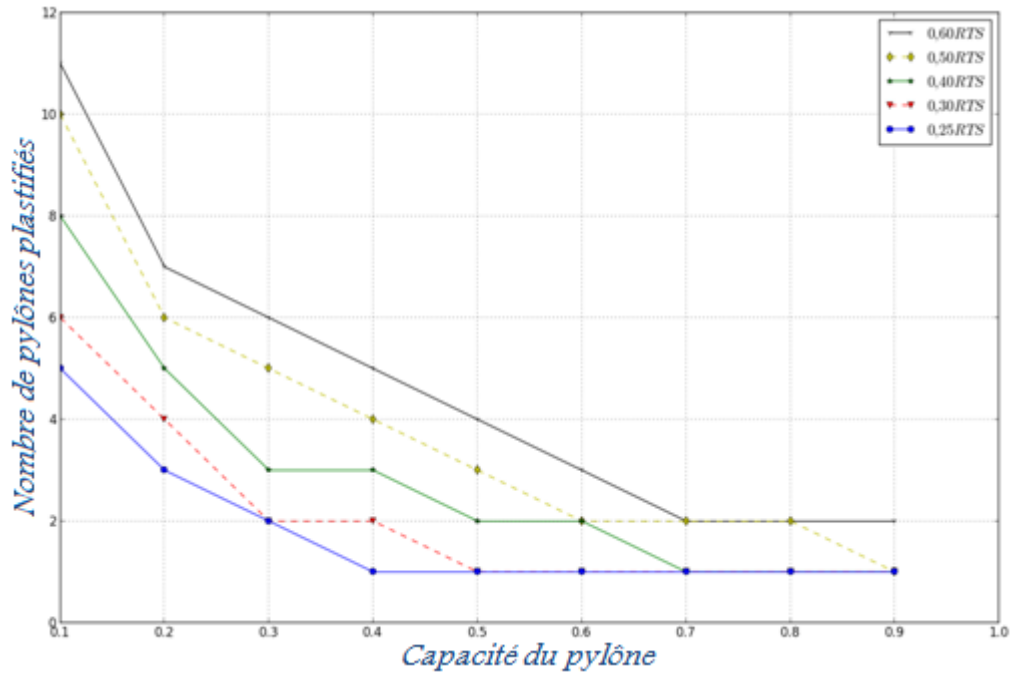


Figure B.11 -Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=304,8 m-Liso=2,1336 m

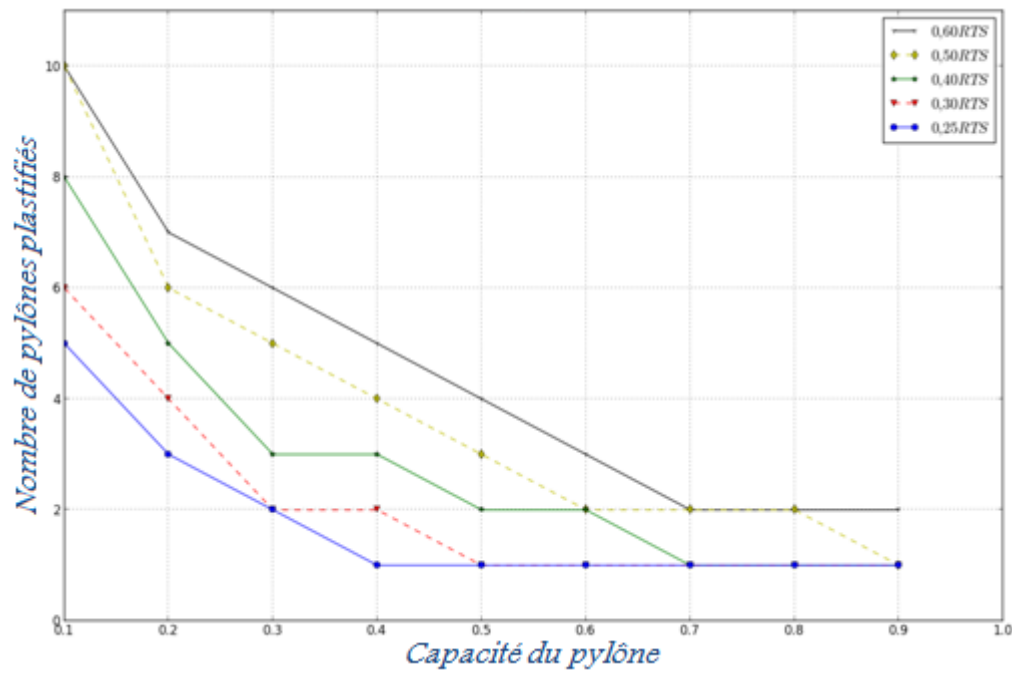


Figure B.12 –Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=304,8 m-Liso=2,1336 m

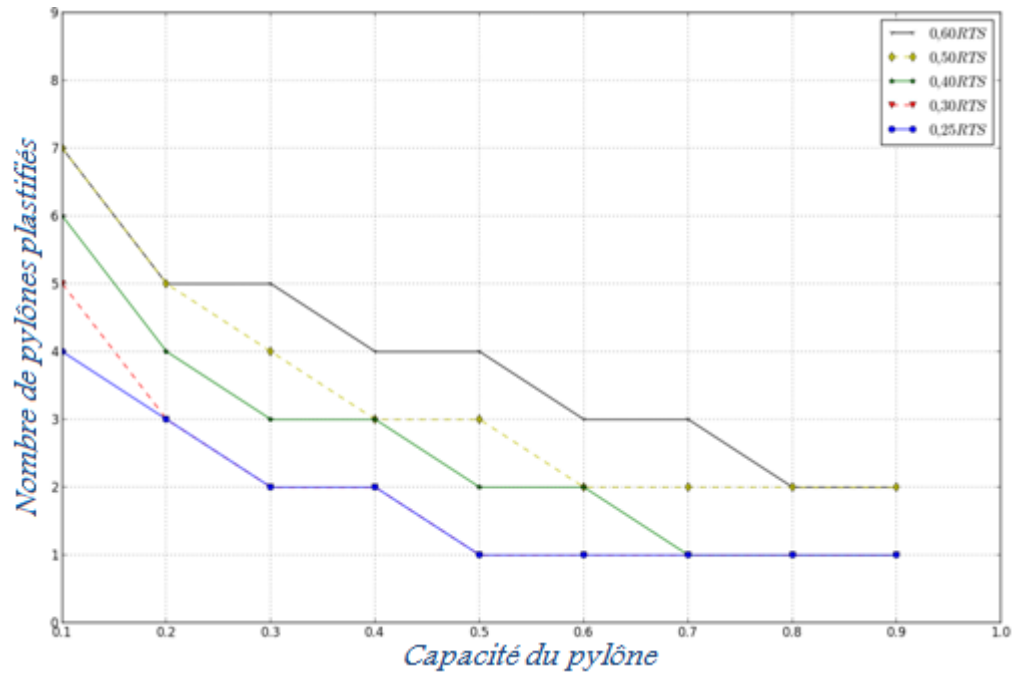


Figure B.13 -Comportement élastique-Portée=457,2 m-Liso=2,1336 m

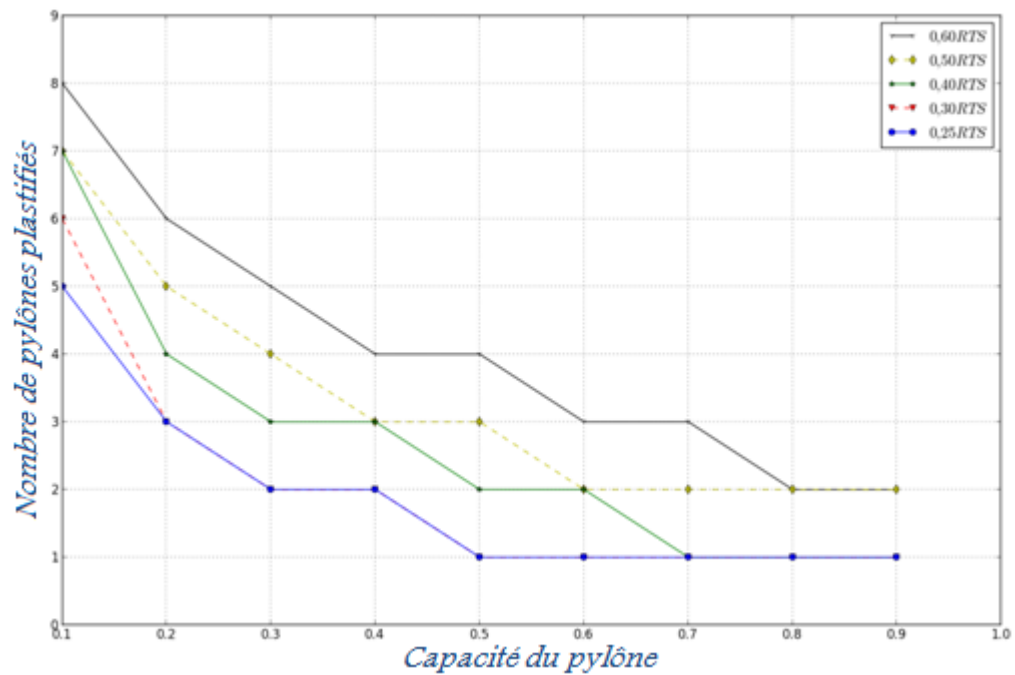


Figure B.14 -Comportement élastique parfaitement plastique-Portée=457,2 m-Liso=2,1336 m

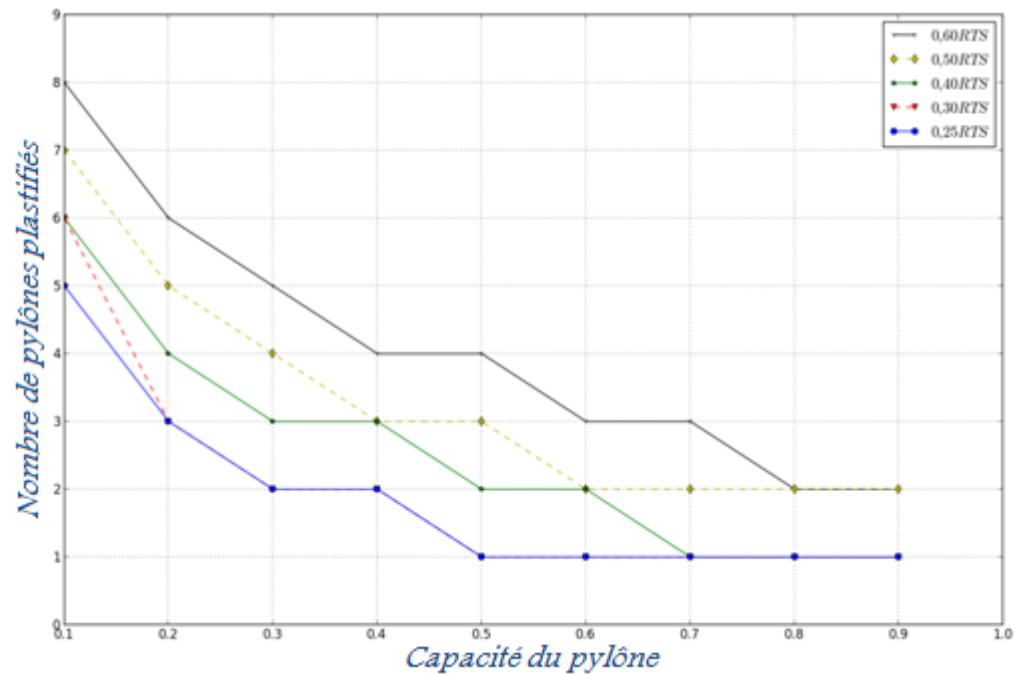


Figure B.15 –Comportement élasto plastique bilinéaire-Portée=457,2 m-Liso=2,1336 m

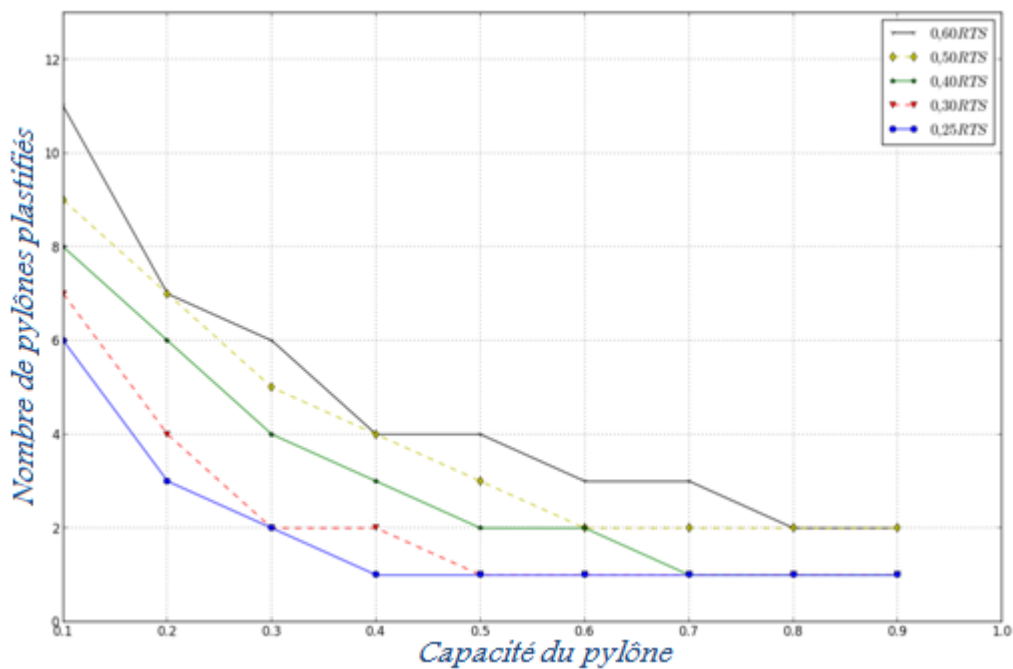


Figure B.16 -Liso=2,1336 m-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

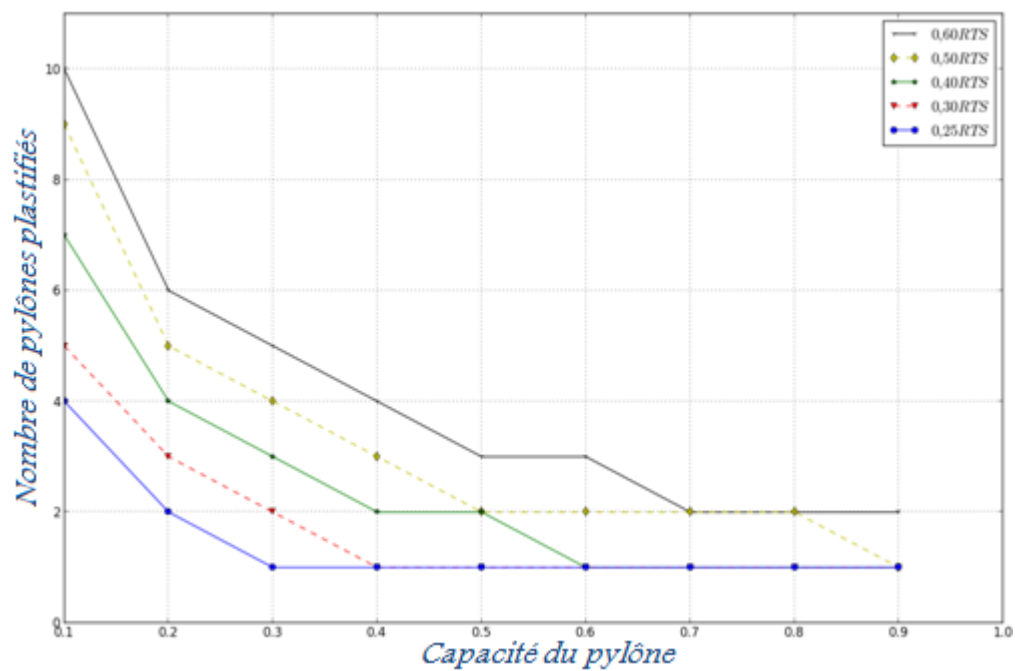


Figure B.17 -Liso=4,2672 m-Portée=152,4 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

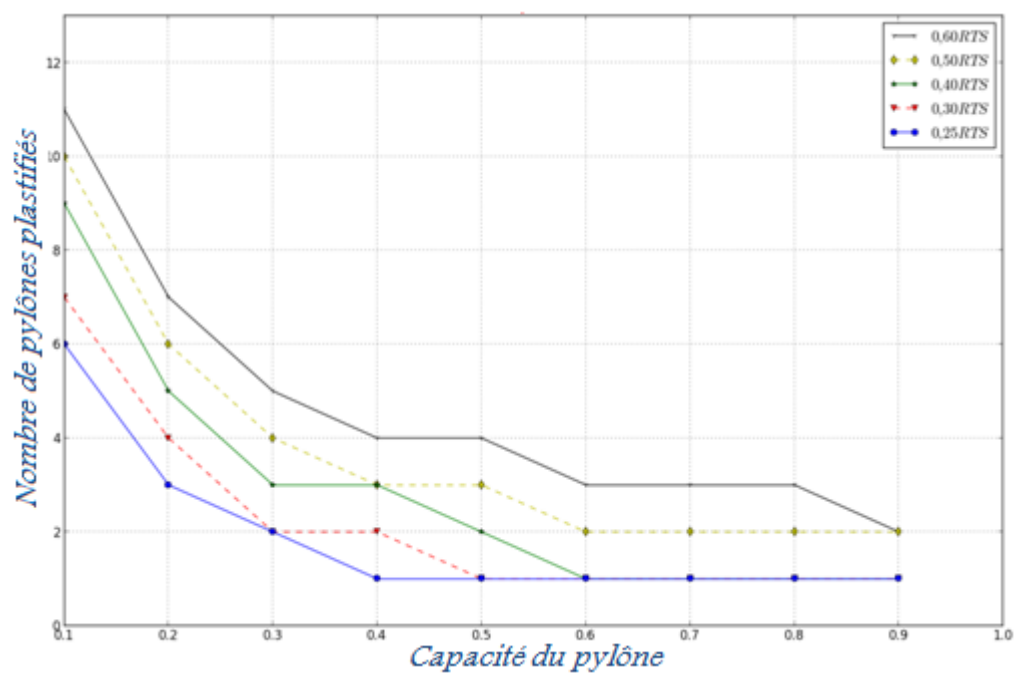


Figure B.18 -Liso=0 m-Portée=304,8 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

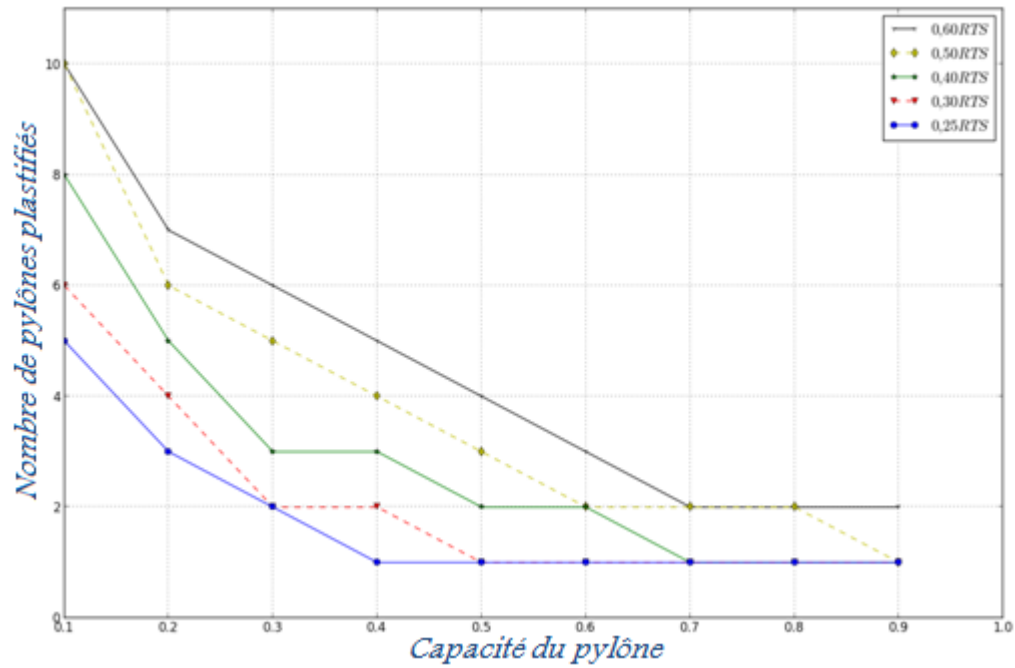


Figure B.19 -Liso=2,1336 m-Portée=304,8 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

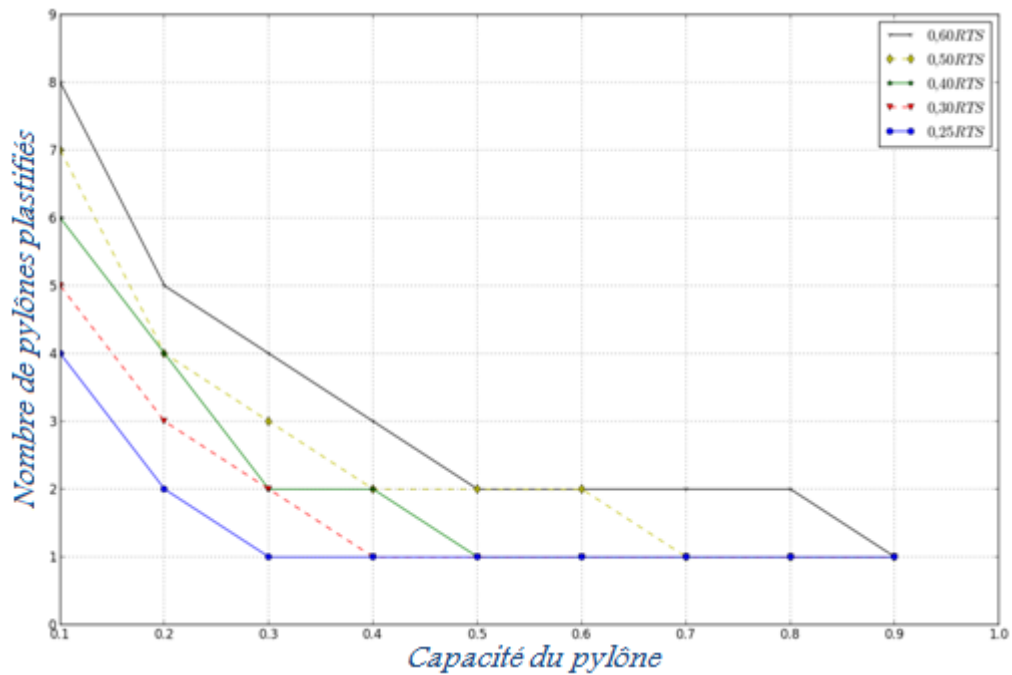


Figure B.20 -Liso=4,2672 m-Portée=304,8 m-Comportement élasto plastique bilinéaire



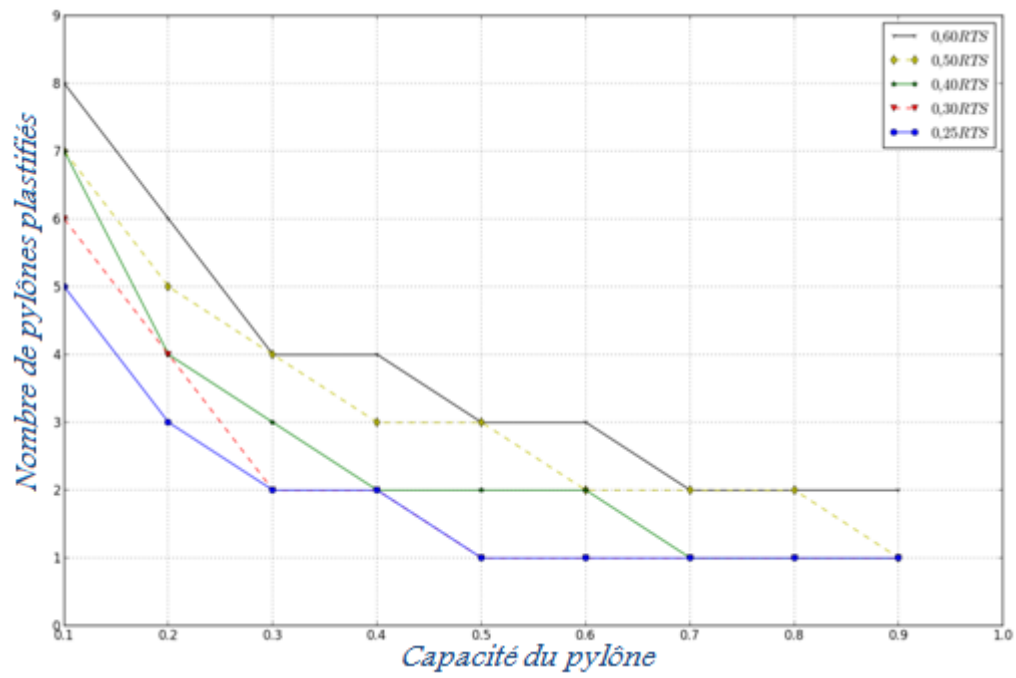


Figure B.21 -Liso=0 m-Portée=457,2 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

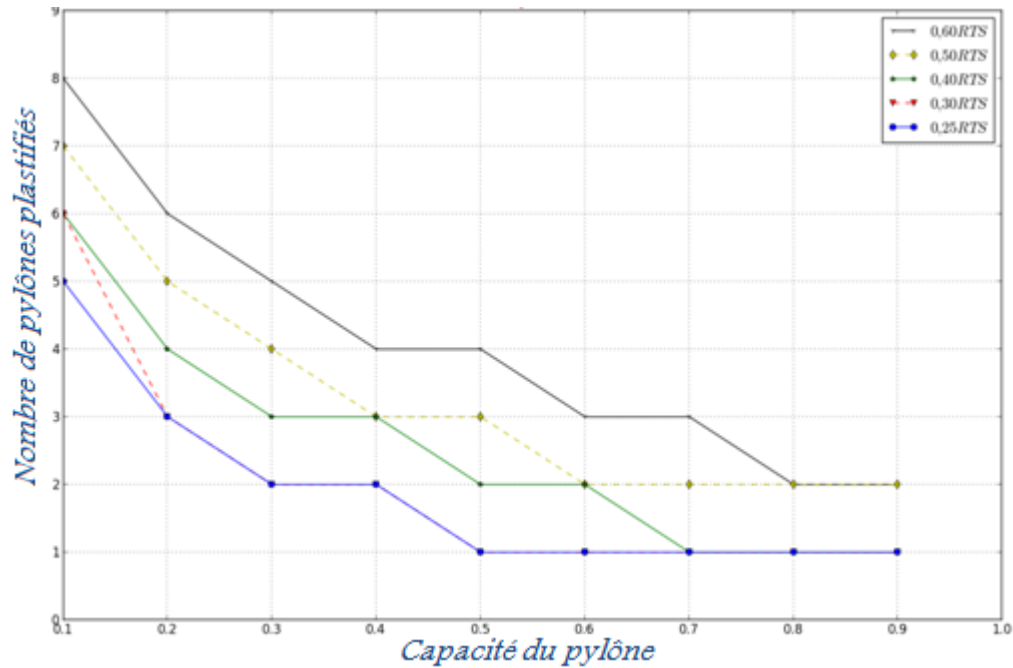


Figure B.22 -Liso=2,1336 m-Portée=457,2 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

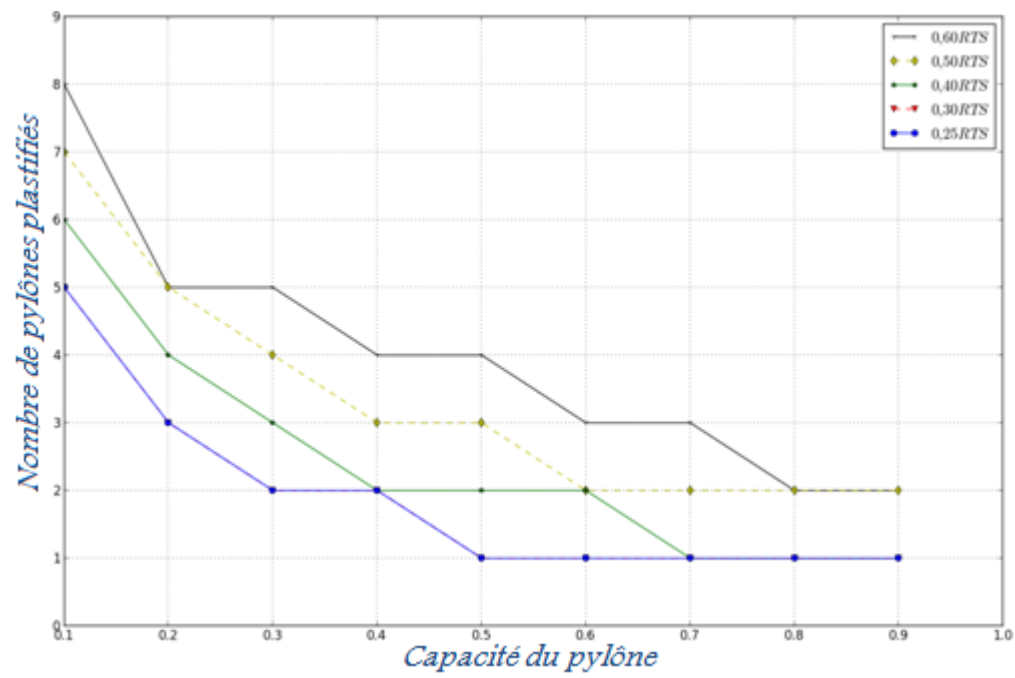


Figure B.23 -Liso=4,2672 m-Portée=457,2 m-Comportement élasto plastique bilinéaire

# Annexe C

## Validation d'un modèle avec poutre en multifibre

### But

Cette étape a pour but de valider le comportement du type d'élément sélectionné, soit des poutres droites de Timoshenko ayant des sections décrites par un maillage en fibres où chaque fibre se comporte comme une poutre d'Euler [Moulin, 2010].

Cette étape est divisée sommairement en deux parties : une première partie qui constitue l'approche numérique avec le logiciel de calcul en élément fini Code\_Aster et une seconde partie qui constitue l'approche analytique. Par la suite on aboutira à la conclusion en comparant les deux approches.

### Description du problème

Il s'agit de valider le comportement multifibre d'une poutre en porte-à-faux soumise à un effort statique appliqué à son extrémité libre.

La poutre étudiée est un profilé de géométrie standard prise du HANDBOOK OF STEEL CONSTRUCTION- ICCA [2010]. Elle est de type W410x46 et a une longueur de 6 mètres (figures 91 et 92).

Tableau 22- Caractéristiques mécaniques de la section en mètre

<i>A</i>	<i>IY</i>	<i>IZ</i>	<i>JX</i>	<i>JG</i>
$5,89^E-4$	$156^E-6$	$5,14^E-6$	$192^E-9$	$197^E-9$

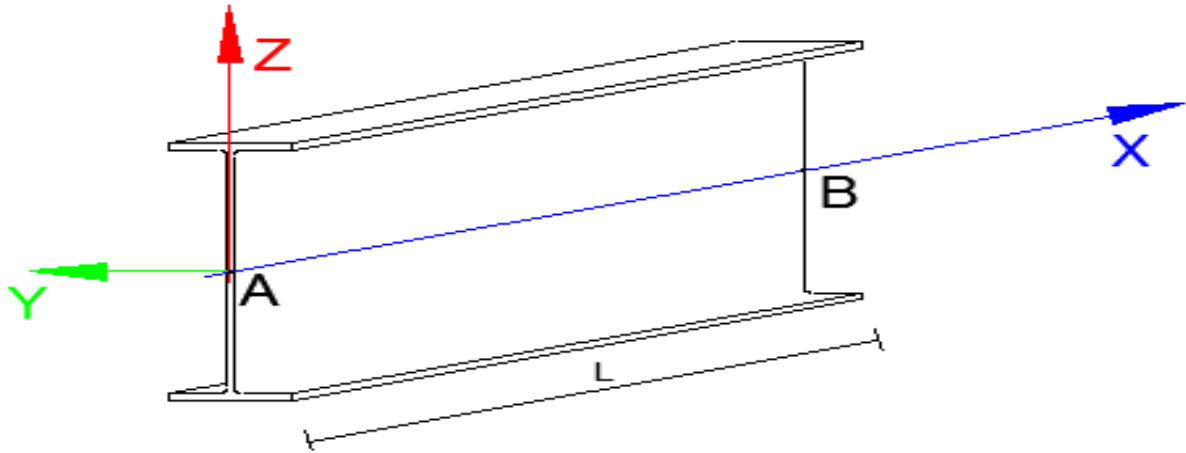


Figure 91- Profilé W410X46

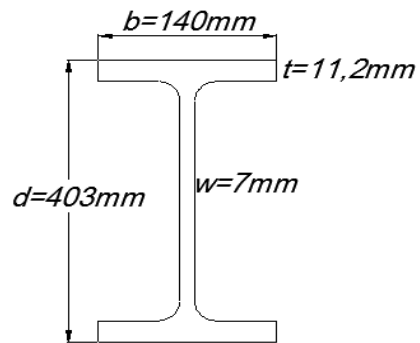


Figure 92- Caractéristiques géométrique de la section W410X46

## Propriétés du matériau

Il s'agit d'un matériau à comportement élasto plastique avec un écrouissage linéaire

- **Élasticité** :
  - Module d'Young  $E = 2.1 \times 10^{11}$  Pa.
- **Plasticité** :
  - Pente de la courbe de traction dans le domaine plastique  $E_T = 1 \times 10^8$  Pa.
  - Limite élastique  $S_y = 400 \times 10^6$  Pa.

C'est-à-dire :

$$\begin{cases} \sigma_L = E \varepsilon_L & \text{si } \varepsilon_L \leq \frac{\sigma_y}{E} \\ \sigma_L = \sigma_y + E_T \left( \varepsilon_L - \frac{\sigma_y}{E} \right) & \text{si } \varepsilon_L \geq \frac{\sigma_y}{E} \end{cases} \quad (26)$$

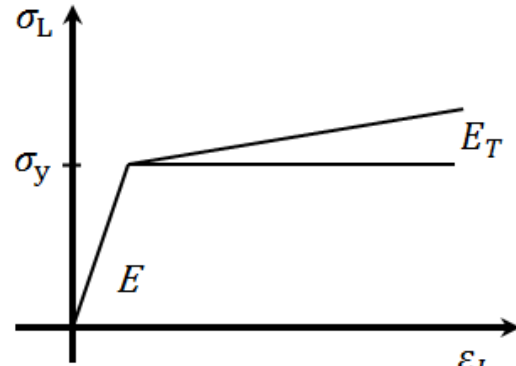


Figure 93- Courbe contrainte déformation d'un acier à comportement élasto plastique avec un écrouissage linéaire

### 7.5. Conditions aux limites et chargement

Les degrés de liberté  $D_X$ ,  $D_Y$ ,  $D_Z$ ,  $DR_X$ ,  $DR_Y$  et  $DR_Z$  au point A sont bloqués.

Une charge statique  $F = (F_x, F_y, F_z)$ , est appliquée au point B.

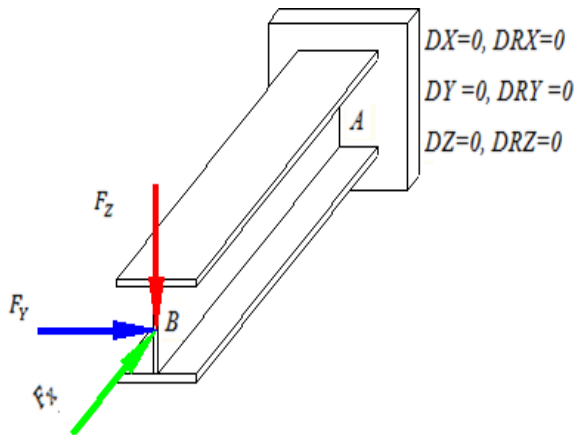


Figure 94- Conditions aux limites et chargement

### Caractéristiques de la modélisation et du maillage

La modélisation est faite en deux parties : la première consiste à concevoir un élément linéique et la seconde partie consiste à affecter à l'élément linéique le maillage et la numérotation des sections de fibres.

La poutre est maillée en 12 segments de mêmes longueurs (figure 95).

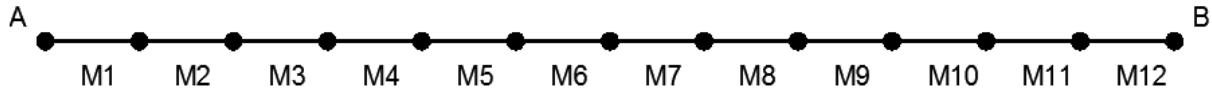


Figure 95- Maillage linéique de la poutre W410x46

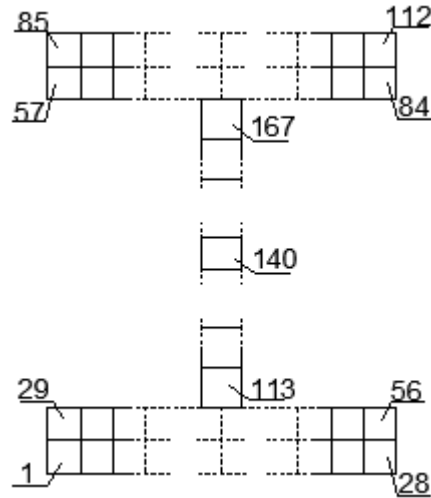


Figure 96- Maillage de la section de la poutre w410x46 en multifibres

La section est maillée avec 167 fibres (figure 96).

Les ailes sont maillées selon une maille quadratique de surface  $2,8^E-5 \text{ m}^2$ . Elles sont numérotées de 1 à 56 pour l'aile inférieure et de 57 à 112 pour l'aile supérieure.

L'âme est maillée partout selon une maille quadratique de surface  $4,9^E-5 \text{ m}^2$  et une maille centrale de surface  $1,82^E-5$ . Les mailles de l'âme sont numérotées de 113 à 167 à partir de l'aile inférieure.

On va s'intéresser d'une part aux contraintes dans les fibres au premier point de Gauss de la maille  $M_1$  la plus proche de l'encastrement et d'autre part au déplacement du nœud B au cours du temps.

Afin de valider les deux types de comportement élastique et plastique, un calcul préliminaire de la force plastique a été réalisé dans le but de prédire analytiquement la capacité de la poutre et ainsi de le comparer avec les résultats obtenus pas Code\_Aster.

Pour une section simplement symétrique par rapport au plan de chargement et de classe I ou II on rappelle :

$$\begin{aligned} - M_p &= F_y \cdot W_{pl} \\ - W_{pl} &= \frac{A}{2} \cdot (h_1 + h_2) \end{aligned}$$

Avec :

- $W_{pl}$  est le module de flexion plastique.
- $h_1=149,62$  mm est la distance entre le centre de gravité de la zone tendue et l'axe neutre de flexion plastique.
- $h_2=149,62$  mm est la distance entre le centre de gravité de la zone comprimée et l'axe neutre de flexion plastique.
- $A$  est la surface de la section.

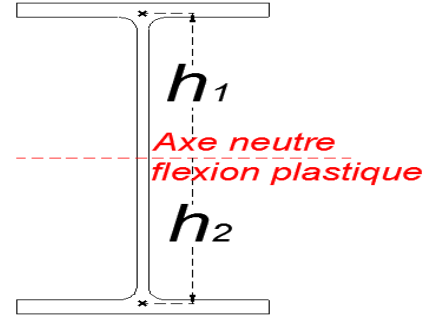


Figure 97-Position de l'axe neutre pour la section de la poutre w410x46

Donc

$$W_{pl}=867841,03 \text{ m}^3$$

Et pour  $F_y= 400\text{MPa}$ , on aura :

- $M_p=347,136$  kN.m
- $F_p=58,44$  kN

À partir de ce dernier résultat de la capacité de la poutre, la modélisation a pris en compte dans un premier temps deux instants de calcul qui représentent deux chargements différents qu'on présente au tableau 10:

Tableau 23- Détails de chargement

	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (kN)
Instant 1	0	0	-45
Instant 2	0	0	-70

Au premier instant la section est dans le domaine élastique alors qu'au deuxième instant la section passe à la plastification. Les résultats sont présentés aux tableaux 24 à 26.

Par la suite les calculs ont été repris mais cette fois le chargement a été appliqué de façon graduelle dans le temps (figure 98).

#### 7.6.Calcul analytique et résultats de calcul

Contrainte en un point de coordonnées ( $V_y, V_z$ ) de la section de la poutre :

$$\sigma = \frac{N}{S} + \frac{M_y}{I_y} \cdot u_z - \frac{M_z}{I_z} \cdot u_y$$

avec

$$M_z = +F_y \cdot L$$

$$M_y = -F_y \cdot L$$

Les contraintes dans les fibres sont calculées analytiquement (Tableau 24) puis avec Code\_Aster (Tableau 25).

Un calcul de l'erreur relative entre les deux calculs est aussi fourni au Tableau 13. L'erreur est toujours inférieure à 0,1%.

Tableau 24- Contraintes calculées dans les fibres analytiquement

N°= Fibre	$\sigma$ (MPa)	N°= Fibre	$\sigma$ (MPa)
1 à 28	-348,438	141	8,417
29 à 56	-338,618	142	20,692
113	-327,570	143	32,967
114	-315,295	144	45,243
115	-303,020	145	57,518
116	-290,745	146	69,793
117	-278,470	147	82,068
118	-266,195	148	94,343
119	-253,920	149	106,618
120	-241,644	150	118,893
121	-229,369	151	131,168
122	-217,094	152	143,444
123	-204,819	153	155,719
124	-192,544	154	167,994
125	-180,269	155	180,269
126	-167,994	156	192,544
127	-155,719	157	204,819
128	-143,444	158	217,094
129	-131,168	159	229,369
130	-118,893	160	241,644
131	-106,618	161	253,919
132	-94,343	162	266,195
133	-82,068	163	278,470
134	-69,793	164	290,745
135	-57,518	165	303,020
136	-45,243	166	315,295
137	-32,967	167	327,570
138	-20,692	57 à 84	338,618
139	-8,417	85 à 112	348,438
140	0,0000		



Tableau 25- Contraintes calculées dans les fibres par Code\_Aster

N°= Fibre	$\sigma$ (MPa)	N°= Fibre	$\sigma$ (MPa)
1 à 28	-348,436	141	8,417
29 à 56	-338,618	142	20,692
113	-327,570	143	32,968
114	-315,295	144	45,243
115	-303,020	145	57,518
116	-290,745	146	69,793
117	-278,470	147	82,068
118	-266,195	148	94,340
119	-253,920	149	106,618
120	-241,644	150	118,893
121	-229,369	151	131,168
122	-217,094	152	143,443
123	-204,819	153	155,719
124	-192,544	154	167,994
125	-180,269	155	180,269
126	-167,994	156	192,545
127	-155,719	157	204,819
128	-143,443	158	217,094
129	-131,168	159	229,369
130	-118,893	160	241,644
131	-106,618	161	253,920
132	-94,340	162	266,195
133	-82,068	163	278,470
134	-69,793	164	290,745
135	-57,518	165	303,020
136	-45,243	166	315,295
137	-32,968	167	327,570
138	-20,692	57 à 84	338,618
139	-8,417	85 à 112	348,436
140	0,000		



Tableau 26- Erreur relative entre le calcul analytique et le calcul expérimental

N°= Fibre	Erreur relative	N°= Fibre	Erreur relative
1 à 28	0,000540%	141	0,000013%
29 à 56	0,000062%	142	0,000170%
113	0,000057%	143	0,000154%
114	0,000023%	144	0,000081%
115	0,000014%	145	0,000039%
116	0,000053%	146	0,000012%
117	0,000097%	147	0,000007%
118	0,000144%	148	0,003201%
119	0,000196%	149	0,000125%
120	0,000161%	150	0,000208%
121	0,000120%	151	0,000276%
122	0,000074%	152	0,000332%
123	0,000023%	153	0,000263%
124	0,000035%	154	0,000176%
125	0,000101%	155	0,000101%
126	0,000176%	156	0,000555%
127	0,000263%	157	0,000023%
128	0,000332%	158	0,000074%
129	0,000276%	159	0,000120%
130	0,000208%	160	0,000161%
131	0,000125%	161	0,000196%
132	0,003201%	162	0,000144%
133	0,000007%	163	0,000097%
134	0,000012%	164	0,000053%
135	0,000039%	165	0,000014%
136	0,000081%	166	0,000023%
137	0,000154%	167	0,000057%
138	0,000170%	57 à 84	0,000062%
139	0,000013%	85 à 112	0,000540%
140	0		

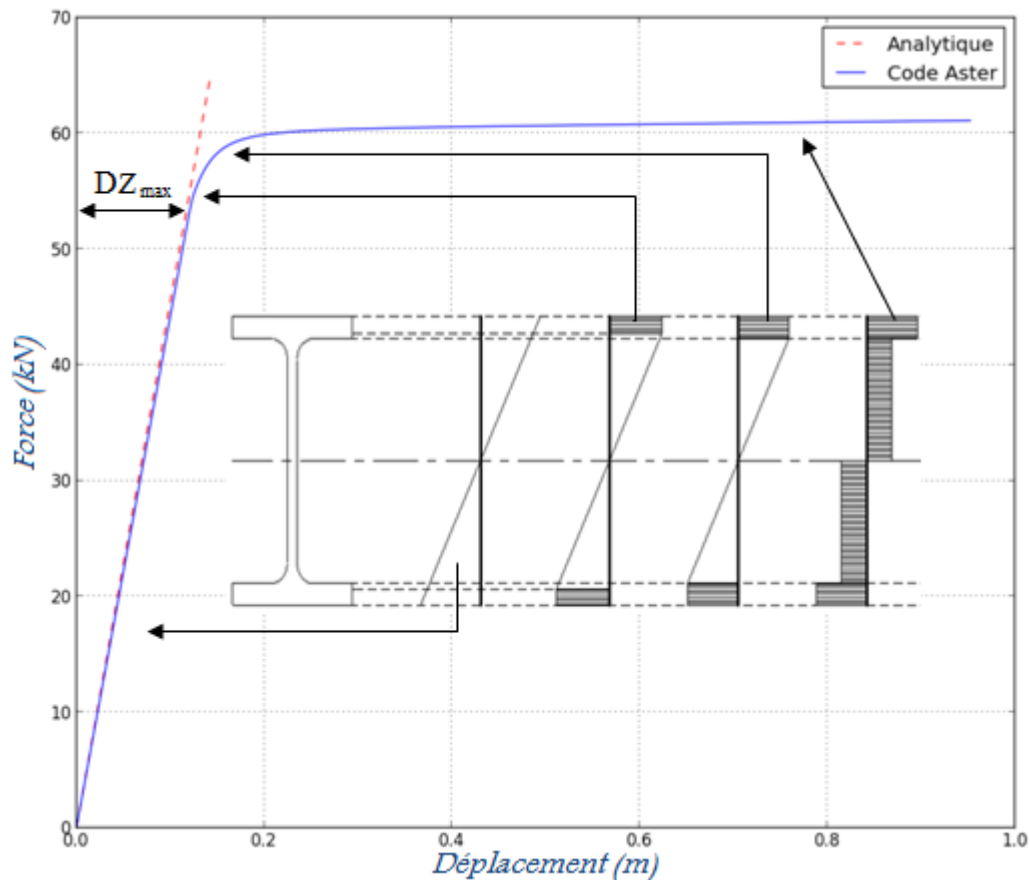


Figure 98- Courbe force déplacement

La courbe force-déplacement présentée à la figure 98 a été établie à partir des résultats de calcul avec Code\_Aster et comparée avec les résultats analytiques dans le domaine élastique.

Le déplacement analytique pour un porte-à-faux soumis à une charge ponctuelle a été calculé selon l'équation :

$$DZ=PL^3/3EI$$

Avec :

- DZ : déplacement selon l'axe Z de la poutre (m).
- P : charge ponctuelle (N).
- L : longueur de la poutre (m).
- E : module élastique de la poutre (N/m<sup>2</sup>).
- I : inertie de la poutre (m<sup>4</sup>).

Tableau 27- Comparaison entre le déplacement du calcul analytique et celui de Code\_Aster

$DZ_{Code\_Aster}(m)$	$DZ_{Analytique}(m)$	Erreur relative
0,1221	0,1187	3%

### Synthèse des résultats

Cette étude a permis de valider la modélisation de poutre par une approche multifibre. Ce type d'élément ainsi que la loi de comportement élasto plastique seront utilisées lors de l'étude présentée au Chapitre IV.



# Annexe D

```
#Auteur: NAOUALI.OUSSAMA.LAMINE
#CANTON DE MOZER AVEC COMPORTEMENT MULTIFIBRE
#AVEC POU_D_TGM
#DATE: 24 JAN 2014
#UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
#####
```

```
#Unite SI (N, m, kg)
#Version Astrer 11.1
```

```
DEBUT();
```

```
#-----
#-----PARAMETRES-----
T_C = -22.367;
T_CG = -31.61;
Rpot = 0.1869;
Epot = 0.009525;
RHOCAB=7675;
RHOC DG=32504;
#-----
# -----Lecture du maillage-----
```

```
MA=LIRE_MAILLAGE (UNITE=20,
                  FORMAT='MED',);
```

```
SECFP=LIRE_MAILLAGE (UNITE=21,
                    FORMAT='MED',);
```

```
SECFC=LIRE_MAILLAGE (UNITE=22,
                    FORMAT='MED',);
```

```
MA=DEFI_GROUP (reuse =MA,
               MAILLAGE=MA,
               CREA_GROUP_MA= (_F (NOM='POTEAU',
                                   UNION=
```

```
('1P1', '1P2', '1P3', '1P4', '2P1', '2P2', '2P3', '2P4', '3P1', '3P2',
'3P3', '3P4', '5P1', '5P2', '5P3', '5P4', '4P1', '4P2', '4P3', '4P4', '6P1', '6P2',
'6P3', '6P4',
'7P1', '7P2', '7P3', '7P4', '8P1', '8P2', '8P3', '8P4', '9P1', '9P2', '9P3', '9P4',
'10P1', '10P2',
'10P3', '10P4', '11P1', '11P2', '11P3', '11P4', '12P1', '12P2', '12P3', '12P4', '
13P1', '13P2',
```

```

'13P3','13P4','14P1','14P2','14P3','14P4','15P1','15P2','15P3','15P4','
16P1','16P2',

'16P3','16P4','1M','2M','3M','4M','5M','6M','7M','8M','9M','10M','11M',
'12M','13M',
                                '14M','15M','16M',),),
_F (NOM='CONSOLE',
    UNION=

('1C1','1C2','1C3','2C1','2C2','2C3','3C1','3C2','3C3','4C1',

'4C2','4C3','5C1','5C2','5C3','6C1','6C2','6C3','7C1','7C2','7C3','8C1'
,'8C2','8C3',

'9C1','9C2','9C3','10C1','10C2','10C3','11C1','11C2','11C3','12C1','12C
2','12C3',

'13C1','13C2','13C3','14C1','14C2','14C3','15C1','15C2','15C3','16C1','
16C2','16C3',),),
_F (NOM='ISOLAT',
    UNION=

('1ISO1','1ISO2','1ISO3','2ISO1','2ISO2','2ISO3','3ISO1',

'3ISO2','3ISO3','4ISO1','4ISO2','4ISO3','5ISO1','5ISO2','5ISO3','6ISO1'
,'6ISO2',

'6ISO3','7ISO1','7ISO2','7ISO3','8ISO1','8ISO2','8ISO3','9ISO1','9ISO2'
,'9ISO3',

'10ISO1','10ISO2','10ISO3','11ISO1','11ISO2','11ISO3','12ISO1','12ISO2'
,'12ISO3',

'13ISO1','13ISO2','13ISO3','14ISO1','14ISO2','14ISO3','15ISO1','15ISO2'
,'15ISO3',
                                '16ISO1','16ISO2','16ISO3',),),
_F (NOM='CABLEC',
    UNION=

('CAB312','CAB323','CAB334','CAB345','CAB356','CAB367',

'CAB378','CAB389','CAB3910','CAB31011','CAB31112','CAB31213','CAB31314'
,'CAB31415',

'CAB31516','CAB31617','CAB212','CAB223','CAB234','CAB245','CAB256','CAB
267','CAB278',

'CAB289','CAB2910','CAB21011','CAB21112','CAB21213','CAB21314','CAB2141
5','CAB21516',

```



```

'CAB21617','CAB112','CAB123','CAB134','CAB145','CAB156','CAB167','CAB17
8','CAB189',

'CAB1910','CAB11011','CAB11112','CAB11213','CAB11314','CAB11415','CAB11
516',

                                'CAB11617',),),),
    _F(NOM='CABLEG',
        UNION=

('CABG12','CABG23','CABG34','CABG45','CABG56','CABG67',

'CABG78','CABG89','CABG910','CABG1011','CABG1112','CABG1213','CABG1314'
,'CABG1415',

                                'CABG1516','CABG1617',),),),
    _F(NOM='Base',

UNION=('1M','2M','3M','4M','5M','6M','7M','8M','9M','10M','11M','12M','
13M','14M','15M','16M',),),),),
    CREA_GROUP_NO=( _F(UNION=('C1F','C2F','C3F','CGF',),),
                    NOM='END_CON',),),

    _F(UNION=('1p1','2p1','3p1','4p1','5p1','6p1','7p1','8p1','9p1','10p1',
'11p1','12p1','13p1','14p1',

                                '15p1','16p1',),),
        NOM='APPUI',),),),);

# AFFECTATION DES MODELES DE COMPORTEMENT

MO=AFFE_MODELE(MAILLAGE=MA,
                VERIF=('NOEUD','MAILLE',),),
                AFFE=( _F(GROUP_MA=('POTEAU','CONSOLE',),),
                        PHENOMENE='MECANIQUE',
                        MODELISATION='POU_D_TGM',),),
                _F(GROUP_MA=('ISOLAT','CABLEG','CABLEC',),),
                    PHENOMENE='MECANIQUE',
                    MODELISATION='CABLE',),),),);

IMPR_RESU(FORMAT='ASTER',
           UNITE=26,
           RESU=_F(MAILLAGE=MA,),),);

GEOMFIBR=DEFI_GEOM_FIBRE(INFO=2,
                           SECTION=( _F(GROUP_FIBRE='GFP',
                                           TOUT_SECT='OUI',
                                           MAILLAGE_SECT=SECFP,
                                           COOR_AXE_POUTRE=(0,0,),),),
                                       _F(GROUP_FIBRE='GFC',
                                           TOUT_SECT='OUI',
                                           MAILLAGE_SECT=SECFC,
                                           COOR_AXE_POUTRE=(0,0,),),),),);

```

```

# DEFINITION DES MATERIAUX
#           DES CARACTERISTIQUES ELASTIQUES et PLASTIQUES DES POUTRES
# Comportement du materiau : E345.

MAT_CONS=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=2.1e+11,
                               NU=0.3,
                               RHO=7850.0,
                               ALPHA=6.7e-06,,),);

MAT_POT=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=2.1E11,
                               NU=0.3,
                               RHO=7850,
                               ALPHA=6.7E-6,),
                      ECRO_LINE=_F(D_SIGM_EPSI=0,
                                   SY=345E6,,),);

MATISO=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=2.1E11,
                               NU=0.27,
                               RHO=7850,
                               ALPHA=1e-6,),
                      CABLE=_F(EC_SUR_E=0.0001,,),);

MATC_C=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=64.8e9,
                               NU=0.3,
                               RHO=RHO CAB,
                               ALPHA=20.7e-6,),
                      CABLE=_F(EC_SUR_E=0.0001,,),);

MATC_G=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=2e11,
                               NU=0.3,
                               RHO=RHO CDG,
                               ALPHA=12.1e-6,),
                      CABLE=_F(EC_SUR_E=0.0001,,),);

COMPFP=DEFI_COMPOR(GEOM_FIBRE=GEOMFIBR,
                  MATER_SECT=MAT_POT,
                  MULTIFIBRE=_F(GROUP_FIBRE='GFP',
                                MATER=MAT_POT,
                                RELATION='VMIS_ISOT_LINE',),);

COMPFC=DEFI_COMPOR(GEOM_FIBRE=GEOMFIBR,
                  MATER_SECT=MAT_CONS,
                  MULTIFIBRE=_F(GROUP_FIBRE='GFC',
                                MATER=MAT_CONS,
                                RELATION='ELAS',),);

#-----
#-----
# ----- CREATION DES CHAMPS DE TEMPERATURE POUR LES CABLES
CONDUCTEURS -----

```

```

CH_C01=CREA_CHAMP (TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                   OPERATION='AFFE',
                   MODELE=MO,
                   AFFE=_F (GROUP_MA='CABLEC',
                             NOM_CMP='TEMP',
                             VALE=0, , ) );

```

```

CH_C02=CREA_CHAMP (TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                   OPERATION='AFFE',
                   MODELE=MO,
                   AFFE=_F (GROUP_MA='CABLEC',
                             NOM_CMP='TEMP',
                             VALE=T_C, , ) );

```

```

Re_CH_C=CREA_RESU (OPERATION='AFFE',
                   TYPE_RESU='EVOL_VARC',
                   NOM_CHAM='TEMP',
                   AFFE=(
                     _F (CHAM_GD=CH_C01,
                           INST=0, , ),
                     _F (CHAM_GD=CH_C02,
                           INST=10, , , ) );

```

```

#-----
#-----
# ----- CREATION DES CHAMPS DE TEMPERATURE POUR LES CABLES DE
GARDE -----

```

```

CH_CG01=CREA_CHAMP (TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                   OPERATION='AFFE',
                   MODELE=MO,
                   AFFE=_F (GROUP_MA='CABLEG',
                             NOM_CMP='TEMP',
                             VALE=0, , ) );

```

```

CH_CG02=CREA_CHAMP (TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                   OPERATION='AFFE',
                   MODELE=MO,
                   AFFE=_F (GROUP_MA='CABLEG',
                             NOM_CMP='TEMP',
                             VALE=T_CG, , ) );

```

```

Re_CH_CG=CREA_RESU (OPERATION='AFFE',
                   TYPE_RESU='EVOL_VARC',
                   NOM_CHAM='TEMP',
                   AFFE=(
                     _F (CHAM_GD=CH_CG01,
                           INST=0, , ),
                     _F (CHAM_GD=CH_CG02,
                           INST=10, , , ) );

```

```

# Affectation des materiaux

```

```

CHMAT=AFPE_MATERIAU (MAILLAGE=MA,
                     MODELE=MO,
                     AFPE=( _F (GROUP_MA='CONSOLE',
                                MATER=MAT_CONS, ),
                            _F (GROUP_MA='POTEAU',
                                MATER=MAT_POT, ),
                            _F (GROUP_MA='ISOLAT',
                                MATER=MATISO, ),
                            _F (GROUP_MA='CABLEC',
                                MATER=MATC_C, ),
                            _F (GROUP_MA='CABLEG',
                                MATER=MATC_G, ), ),
                     AFPE_COMPOR=( _F (GROUP_MA='POTEAU',
                                         COMPOR=COMPFP, ),
                                    _F (GROUP_MA='CONSOLE',
                                         COMPOR=COMPFC, ), ),
                     AFPE_VARC=( _F (GROUP_MA='CABLEC',
                                       NOM_VARC='TEMP',
                                       EVOL=Re_CH_C,
                                       PROL_DROITE='CONSTANT',
                                       PROL_GAUCHE='CONSTANT',
                                       VALE_REF=0, ),
                                   _F (GROUP_MA='CABLEG',
                                       NOM_VARC='TEMP',
                                       EVOL=Re_CH_CG,
                                       PROL_DROITE='CONSTANT',
                                       PROL_GAUCHE='CONSTANT',
                                       VALE_REF=0, ), ), );

# AFFECTATION DES CARACTERISTIQUES DES ELEMENTS

CAREL=AFPE_CARA_ELEM (MODELE=MO,
                     POUTRE=( _F (GROUP_MA='POTEAU',
                                   SECTION='CERCLE',
                                   CARA=('R','EP'),
                                   VALE=(Rpot,Epot, ), ),
                            _F (GROUP_MA='CONSOLE',
                                   SECTION='CERCLE',
                                   CARA=('R','EP'),
                                   VALE=(0.0889,0.0047625, ), ), ),
                     CABLE=( _F (GROUP_MA='ISOLAT',
                                   SECTION=0.0059557409, ),
                            _F (GROUP_MA='CABLEC',
                                   SECTION=0.00086129, ),
                            _F (GROUP_MA='CABLEG',
                                   SECTION=9.65e-05, ), ),
                     ORIENTATION=( _F (GROUP_MA='POTEAU',
                                       CARA='ANGL_VRIL',
                                       VALE=0, ),
                                   _F (GROUP_MA='CONSOLE',
                                       VALE=0, ), );

```

```

                CARA='ANGL_VRIL',
                VALE=0,,),),
    GEOM_FIBRE=GEOMFIBR,
    MULTIFIBRE=( _F(GROUP_MA='POTEAU',
                    GROUP_FIBRE='GFP',),),
                _F(GROUP_MA='CONSOLE',
                    GROUP_FIBRE='GFC',),),),);

#-----
# ----- DEFINITION DES CHARGEMENTS VARIABLES -----
#
# fonction de chargement :
# fonction de chargement : constant. Valeur maxi : 0.000000e+00

LIST_STA=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=0.0,
                       INTERVALLE=( _F(JUSQU_A=10,
                                         PAS=1,),),
                              _F(JUSQU_A=14,
                                  PAS=0.01,),),),);

LIST2=DEFI_LIST_INST(DEFI_LIST=_F(METHODE='AUTO',
                                  LIST_INST=LIST_STA,
                                  PAS_MINI=1e-05,),),);

GRAVITE=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                       PESANTEUR=_F(GRAVITE=9.81,
                                      DIRECTION=(0,0,-1,),),),);

CL_APPUI=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                        DDL_IMPO=_F(GROUP_NO=('APPUI','END_CON',),),
                                DX=0,
                                DY=0,
                                DZ=0,
                                DRX=0,
                                DRY=0,
                                DRZ=0,),),);

FORC_St=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                       DDL_IMPO=_F(GROUP_NO=('1p9','1p10','1p11',),),
                                DX=0,),),
    FORCE_NODALE=_F(GROUP_NO='1p11',
                   FZ=-1992.27,),),);

forceG=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                      DDL_IMPO=_F(GROUP_NO='1p5',
                                    DX=0,),),
    FORCE_NODALE=_F(GROUP_NO='1p5',
                   FZ=-567.37,),),);

FLIN = FORMULE(VALE='INST/10',
              NOM_PARA='INST',);

```

```

# ----- DEPLACEMENTS -----
# -----
# ----- EFFORTS -----
# *****
#           C A L C U L   N O N   L I N E A I R E
# *****

STNL=STAT_NON_LINE (MODELE=MO,
                    CHAM_MATER=CHMAT,
                    CARA_ELEM=CAREL,
                    EXCIT=( _F (CHARGE=CL_APPUI, ),
                             _F (CHARGE=GRAVITE,
                                   FONC_MULT=FLIN, ),
                             _F (CHARGE=FORC_St, ),
                             _F (CHARGE=forceG, ), ),
                    COMP_INCR= _F (RELATION='MULTIFIBRE',
                                     DEFORMATION='GROT_GDEP',
                                     GROUP_MA=('POTEAU', 'CONSOLE', ), ),
                    COMP_ELAS= _F (RELATION='CABLE',
                                     DEFORMATION='GROT_GDEP',

GROUP_MA=('ISOLAT', 'CABLEC', 'CABLEG', ), ),
                    INCREMENT= _F (LIST_INST=LIST_STA,
                                     INST_FIN=10, ),
                    NEWTON= _F (MATRICE='TANGENTE',
                                 REAC_ITER=1, ),
                    CONVERGENCE= _F (ITER_GLOB_MAXI=100, ), );

DTNL=DYNA_NON_LINE (MODELE=MO,
                    CHAM_MATER=CHMAT,
                    CARA_ELEM=CAREL,
                    EXCIT=( _F (CHARGE=CL_APPUI, ),
                             _F (CHARGE=GRAVITE, ), ),
                    COMP_INCR= _F (RELATION='MULTIFIBRE',
                                     DEFORMATION='GROT_GDEP',
                                     GROUP_MA=('POTEAU', 'CONSOLE', ), ),
                    COMP_ELAS= _F (RELATION='CABLE',
                                     DEFORMATION='GROT_GDEP',

GROUP_MA=('CABLEC', 'CABLEG', 'ISOLAT', ), ),
                    ETAT_INIT= _F (EVOL_NOLI=STNL, ),
                    INCREMENT= _F (LIST_INST=LIST_STA,
                                     INST_FIN=14, ),
                    SCHEMA_TEMPS= _F (SCHEMA='HHT',
                                       ALPHA=-0.3,
                                       FORMULATION='DEPLACEMENT', ),
                    NEWTON= _F (MATRICE='TANGENTE',
                                 REAC_ITER=1, ),
                    CONVERGENCE= _F (ITER_GLOB_MAXI=100,
                                       ARRET='OUI', ),
                    SOLVEUR= _F (METHODE='MULT_FRONT', ), );

```

```

#*****
EXTRACTION DES RESULTATS
#*****

DTNL=CALC_ELEM(reuse =DTNL,
               RESULTAT=DTNL,
               TOUT='OUI',
               OPTION='SIEF_ELNO',);

STNL=CALC_NO(reuse =STNL,
             RESULTAT=STNL,
             OPTION=('REAC_NODA','FORC_NODA',),);

DTNL=CALC_NO(reuse =DTNL,
             RESULTAT=DTNL,
             OPTION=('REAC_NODA','FORC_NODA',),);

#*****
#
#                               IMPRESSION DES RESULTATS
#*****

IMPR_RESU(MODELE=MO,
          FORMAT='MED',
          UNITE=14,
          RESU=_F(MAILLAGE=MA,
                 RESULTAT=STNL,
                 TOUT='OUI',),);

IMPR_RESU(MODELE=MO,
          FORMAT='MED',
          UNITE=16,
          RESU=_F(MAILLAGE=MA,
                 RESULTAT=DTNL,
                 NOM_CHAM='DEPL',
                 TOUT_CMP='OUI',
                 TOUT='OUI',),);

TABLE1=CREA_TABLE(RESU=_F(RESULTAT=DTNL,
                          NOM_CHAM='REAC_NODA',
                          TOUT_CMP='OUI',
                          GROUP_NO='APPUI',),);

#-----
#-----

PYL1=CREA_TABLE(RESU=_F(RESULTAT=DTNL,
                        NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
                        TOUT_ORDRE='OUI',
                        TOUT_CMP='OUI',
                        GROUP_MA='1M',),);

```

```
PYL2=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,  
    NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
    TOUT_ORDRE='OUI',  
    TOUT_CMP='OUI',  
    GROUP_MA='2M',),),);
```

```
PYL3=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,  
    NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
    TOUT_ORDRE='OUI',  
    TOUT_CMP='OUI',  
    GROUP_MA='3M',),),);
```

```
PYL4=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,  
    NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
    TOUT_ORDRE='OUI',  
    TOUT_CMP='OUI',  
    GROUP_MA='4M',),),);
```

```
PYL5=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,  
    NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
    TOUT_ORDRE='OUI',  
    TOUT_CMP='OUI',  
    GROUP_MA='5M',),),);
```

```
PYL6=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,  
    NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
    TOUT_ORDRE='OUI',  
    TOUT_CMP='OUI',  
    GROUP_MA='6M',),),);
```

```
PYL7=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,  
    NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
    TOUT_ORDRE='OUI',  
    TOUT_CMP='OUI',  
    GROUP_MA='7M',),),);
```

```
PYL8=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,  
    NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
    TOUT_ORDRE='OUI',  
    TOUT_CMP='OUI',  
    GROUP_MA='8M',),),);
```

```
PYL9=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,  
    NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
    TOUT_ORDRE='OUI',  
    TOUT_CMP='OUI',  
    GROUP_MA='9M',),),);
```

```
PYL10=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,  
    NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
    TOUT_ORDRE='OUI',
```



```

        TOUT_CMP='OUI',
        GROUP_MA='10M',),);

PYL11=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,
        NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
        TOUT_ORDRE='OUI',
        TOUT_CMP='OUI',
        GROUP_MA='11M',),);

PYL12=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,
        NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
        TOUT_ORDRE='OUI',
        TOUT_CMP='OUI',
        GROUP_MA='12M',),);

PYL13=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,
        NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
        TOUT_ORDRE='OUI',
        TOUT_CMP='OUI',
        GROUP_MA='13M',),);

PYL14=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,
        NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
        TOUT_ORDRE='OUI',
        TOUT_CMP='OUI',
        GROUP_MA='14M',),);

PYL15=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,
        NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
        TOUT_ORDRE='OUI',
        TOUT_CMP='OUI',
        GROUP_MA='15M',),);

PYL16=CREA_TABLE (RESU=_F (RESULTAT=DTNL,
        NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
        TOUT_ORDRE='OUI',
        TOUT_CMP='OUI',
        GROUP_MA='16M',),);

IMPR_TABLE (TABLE=TABLE1,
        UNITE=18,);

IMPR_TABLE (TABLE=PYL1,
        UNITE=32,);

IMPR_TABLE (TABLE=PYL2,
        UNITE=34,);

IMPR_TABLE (TABLE=PYL3,
        UNITE=36,);

IMPR_TABLE (TABLE=PYL4,

```

```
        UNITE=38,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL5,  
            UNITE=40,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL6,  
            UNITE=42,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL7,  
            UNITE=44,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL8,  
            UNITE=46,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL9,  
            UNITE=48,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL10,  
            UNITE=50,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL11,  
            UNITE=52,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL12,  
            UNITE=54,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL13,  
            UNITE=56,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL14,  
            UNITE=58,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL15,  
            UNITE=60,);  
  
IMPR_TABLE (TABLE=PYL16,  
            UNITE=62,);  
  
#-----  
#-----  
  
FIN();  
#CHECKSUM:8ab13fc5490459a58835713253aff02f  -:FIN CHECKSUM
```

# LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abbas, M. (2011). Opérateur STAT\_NON\_LINE (document d'utilisation U4.51.03). EDFR&D.
- American Society of Civil Engineers. (2005). ASCE48-05
- Bérubé, L. P.(2012). Effets de l'ajout d'un mécanisme ductile à la console sur la réponse d'un pylône aux bris de conducteurs, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.
- Campbell, D. B (1970). Unbalanced tensions in transmission lines. J. Structural Div. ASCE 962189-2207.
- Flejou, J.-L.(2010). Modélisation des câbles (Rapport technique R3.08.02). EDFR&D.
- Flejou, J.-L.(2011).Modélisations POU\_D\_TG, POU\_D\_TGM (Document d'utilisation U3.11.04). EDFR&D.
- Flejou, J.-L.(2011). Modélisation statique et dynamique des poutres en grandes rotations (Rapport technique R5.03.40). EDFR&D.
- Govers, A.(1970). Efforts dynamiques unidirectionnels sur les pylônes à haute tension après une rupture de conducteur, Comptes rendus de la Conférence internationale des grands réseaux électriques, rapport 22-03.
- Géradin, M and Rixen, D. Mechanical Vibrations: Theory and Applications to Structural Dynamics. Direct Time-Integration Methods, Second Edition.
- Guo-Hui Shen, C. S. Cai, P.E, F. ASCE, BING-NAN SUN, and WEN-JUAN LOU. (2011). Study of dynamic impacts on transmission- line systems attributable to conductor breakage using the finite-element method, Journal of performance of constructed facilities ASCE/March/April.
- Greffet, N. (2012). Opérateur DYNA\_NON\_LINE (Document d'utilisation U4.53.01). EDF&D.
- Haro, L, Magnusson, B, et Põnni, K.(1956). Étude des sollicitations sur un support après rupture d'un conducteur, Comptes rendus de la Conférence internationale des grands réseaux électriques, rapport 210.
- HANDBOOK OF STEEL CONSTRUCTION-CISC-ICCA. Tenth edition (2010). Canadian institute of steel construction.

Hashamdar, H, Z. Ibrahim and M. Jameel.(2011). Finite element analysis of nonlinear structures with Newmark method, International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(6), 1395-1403, 18 March, (2011), Department of Civil Engineering, University of Malaya.

JCT, (2006)Wikipedia.Website. [http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode\\_de\\_Newmark](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_de_Newmark)

Kempner, LEON.(1997).Longitudinal impact loading on electrical transmission line towers: A scale model study, ProQuest Dissertations and Theses; ProQuest Dissertations & Theses (PQDT).

Lapointe, M. Dynamic analysis of a power line subjected to longitudinal loads.

Lefebvre, J.-P. (2014). Opérateur DEFI\_MATERIAU (Document d'utilisation U4.43.01). EDF&D.

Mozer, J. D. (1978). Longitudinal Unbalanced loads on transmission line structure, Electric Power Research Institute.

McClure, G. et Tinawi, R.(1988), Comportement dynamique des lignes aériennes de transport d'électricité du aux bris de câbles. I. Modélisation mathématique, Département de génie civil, École polytechnique de Montréal.

McClure, G. et Tinawi, R.(1988), Comportement dynamique des lignes aériennes de transport d'électricité du aux bris de câbles. II. Problèmes numériques associées à la modélisation mathématique, Département de génie civil, École polytechnique de Montréal.

McClure, G. and LAPOINTE, M. (2003), Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines/Computers and Structures, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University.

Moulin, S. (2010). Élément de poutre multifibre (droite) (Rapport technique R3.08.08). EDF & D.

Peabody, A.(2004). Applying shock damping to the problem of transmission line cascade, McGill University.

Proix, J.-M. (2009). Intégration des relations de comportement élasto-plastique de Von Mises (Rapport technique R5.03.02). EDF&D.

Proix, J.-M. (2009). Opérateur DEFI\_COMPOR (Document d'utilisation U4.43.06). EDF & D.

Siddiqui, F. and Flemming, J. (1983). Broken wire analysis of transmission line systems.