

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

ESSAI DYNAMIQUE ET MODÉLISATION
PAR ÉLÉMENTS FINIS DE LA PILE D'UN
PONT SOUMISE À UNE CHARGE
D'IMPACT D'UN CAMION
SEMI-REMORQUE

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

François SETTECASI

Jury : Nathalie ROY (directrice)
Charles-Philippe LAMARCHE (codirecteur)
Sébastien LANGLOIS (évaluateur)
Marc QUIERTANT (évaluateur)

RÉSUMÉ

La collision d'un camion sur un pont est un événement courant et peut engendrer des efforts considérables dans la structure. Selon la norme canadienne CSA-S6-14, la pile d'un pont doit être conçue pour résister à une charge statique de 1400 kN à 1,2 m au-dessus du niveau du sol. Peu d'études récentes abordent ce sujet et aucune des études trouvées dans la littérature ne présente des résultats expérimentaux. Le but de ce mémoire est d'approfondir davantage nos connaissances sur le phénomène des collisions d'un véhicule avec un pont et de recueillir des résultats tant expérimentaux que numériques. La méthode expérimentale comprend les essais en laboratoire de deux piles en béton armé à échelles réduites 1 : 6 ainsi que la modélisation de ces essais à l'aide d'un modèle par éléments finis avec le logiciel LS-DYNA. Le premier essai consiste à imposer un chargement cyclique quasi-statique au niveau du chevêtre de la pile. Ceci permet de caractériser la pile et de calibrer un modèle numérique statique. Par la suite, un deuxième modèle numérique incluant la superstructure est utilisé pour simuler la collision d'un camion semi-remorque sur la pile étudiée. Les résultats du déplacement du chevêtre en fonction du temps du modèle numérique sont par la suite utilisés comme cas de chargement du deuxième essai. Finalement, un troisième modèle numérique est calibré à l'aide des résultats expérimentaux du deuxième essai. Les résultats démontrent que le montage expérimental ainsi que le modèle numérique reproduisent avec succès une charge d'impact. De plus, la nature dynamique de l'essai atteint des taux de déformations dans l'armature au-dessus de la limite quasi-statique. L'essai dynamique présente donc une charge pseudo-statique supérieure à la charge quasi-statique équivalente. Finalement, la force pseudo-statique maximale à l'échelle 1 : 1 atteint plus de 1832 kN alors que la force prescrite par la norme CSA-S6-14 est de 1400 kN.

Mots-clés : Pont, Pile, Impact, Collision, Modélisation, Éléments finis, LS-DYNA

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Mise en contexte	1
1.2	Problématique	2
2	REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
2.1	Normes	3
2.1.1	Pont	3
2.1.2	Bâtiment	6
2.2	Méthodes d'analyses statiques	6
2.2.1	Méthode statique équivalente	6
2.2.2	Static bracketed impact analysis (SBIA)	7
2.3	Méthodes d'analyses dynamiques	7
2.3.1	Superposition modale et spectres d'impact	9
2.3.2	Intégration temporelle	15
2.4	Caractérisation de la charge d'impact d'un camion	17
2.4.1	Impacts sur des glissières en béton armé	17
2.4.2	Impacts sur des piles de pont	18
3	OBJECTIFS DE RECHERCHE	21
3.1	Objectifs	21
3.2	Méthodologie	21
4	ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	23
4.1	Facteur d'échelle	23
4.2	Superstructure	23
4.3	Essai 1	24
4.3.1	Description du spécimen	24
4.3.2	Construction du spécimen	24
4.3.3	Matériaux	25
4.3.4	Banc d'essai	26
4.3.5	Cas de chargement	29
4.4	Essai 2	31
4.4.1	Description du spécimen	31
4.4.2	Construction du spécimen	31
4.4.3	Matériaux	32
4.4.4	Banc d'essai	38
4.4.5	Cas de chargement	40
5	MODÉLISATION	43
5.1	Modèle numérique	43
5.2	Béton	45

5.2.1	Calibration et validation du modèle de béton	46
5.2.2	Maillage	50
5.2.3	Éléments contacts	50
5.3	Armatures	52
5.3.1	Maillage	53
5.3.2	Ancrage des armatures	53
5.3.3	Éléments contacts armature/béton	55
5.4	Chargement	57
5.4.1	Initialisation du modèle	57
5.4.2	Chargement quasi-statique du modèle 1	58
5.4.3	Chargement dynamique du modèle 2.1	60
5.4.4	Chargement dynamique du modèle 2.2	60
5.5	Stabilité des modèles et amortissement	62
5.5.1	Énergie d'hourglass	62
5.5.2	Conditions limites	63
5.5.3	Amortissement	63
6	RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSULTATS	65
6.1	Essai quasi-statique (modèle 1 et essai 1)	65
6.1.1	Validation du modèle 1	65
6.1.2	Analyse visuelle de l'endommagement	66
6.1.3	Résultats des jauges, LVDTs et potentiomètres	68
6.1.4	Courbes d'hystérésis	81
6.1.5	Conclusion sur l'essai quasi-statique	83
6.2	Modélisation de la charge d'impact (modèle 2.1)	83
6.2.1	Validation du modèle 2.1	83
6.2.2	Résultats du modèle 2.1	84
6.2.3	Endommagement du modèle 2.1	84
6.2.4	Conclusion sur l'essai 2.1	85
6.3	Charge d'impact (modèle 2.2 et essai 2)	88
6.3.1	Validation du modèle 2.2	88
6.3.2	Propriétés dynamiques de la pile 2	89
6.3.3	Commande vs réponse du vérin	91
6.3.4	Analyse visuelle de l'endommagement	93
6.3.5	Résultats des jauges et potentiomètres	97
6.3.6	Graphiques du déplacement vertical des poteaux	107
6.3.7	Résistance de la pile 2 et du modèle 2.2	111
6.3.8	Conclusion sur l'essai 2	116
6.4	Comparaison de l'hystérésis des essais 1 et 2	116
7	CONCLUSION	123
A	COMPLÉMENT DU CHAPITRE 4 : EXPÉRIMENTAL	125
A.1	Super-structure	125
A.2	Mélange de béton	126

A.3 Plans	127
B COMPLÉMENT DU CHAPITRE 5 : MODÉLISATION	141
B.1 Code LS-DYNA du modèle 1 simplifié	141
B.2 Code LS-DYNA du modèle 2.1 simplifié	154
B.3 Code LS-DYNA du modèle 2.2 simplifié	166
C COMPLÉMENT DU CHAPITRE 6 : RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSULTATS	187
C.1 Essai quasi-statique (modèle 1 et essai 1)	187
C.1.1 Graphiques des résultats des jauges des armatures	187
C.2 Charge d'impact (modèle 2.2 et essai 2)	195
C.2.1 Graphiques des résultats des jauges des armatures	195
C.2.2 Graphiques des résultats des jauges à béton	202

LISTE DES FIGURES

2.1	Résultat de l'impact d'un petit camion Ford	4
2.2	Résultat de l'impact d'une camionnette Chevrolet C2500	4
2.3	Forces d'impact engendrées lors d'essais grandeur réelle	5
2.4	Résumé de la Static Bracketed Impact Analysis	8
2.5	Différences entre le spectre de Cowan et de Fan et Yuan	10
2.6	Modélisation de l'impact idéalisée avec un système à un degré de liberté dynamique	10
2.7	Type de forces d'impact et représentation d'un système à un degré de liberté	12
2.8	Diagramme schématisant la méthode d'analyse par superposition modale .	14
2.9	Analyse par intégration temporelle	17
2.10	Modèles des camions analysés	18
2.11	Graphique force - déplacement pour un impact d'un camion benne	20
2.12	Graphique force - vitesse pour un camion benne	20
2.13	Graphique force - vitesse pour un semi-remorque	20
4.1	Dimensions de la pile 01	25
4.2	Résultats des essais de traction des barres d'armature 6,35 mm de la pile 01	26
4.3	Résultats des essais de compression du béton de la pile 01 le jour de l'essai	27
4.4	Banc d'essai de la pile 01	28
4.5	Instrumentation externe de la pile 01	28
4.6	Emplacement des jauges sur les barres d'armature	29
4.7	Chargement imposé à la pile 01	30
4.8	Dimensions de la pile 02	31
4.9	Étapes de construction de la pile 02	32
4.10	Résultats des essais de traction quasi-statique des barres d'armature 6,35 mm de la pile 02	34
4.11	Augmentation de la résistance de l'acier en fonction du taux de chargement	35
4.12	Résultats des essais de compression du béton de la pile 02 le jour de l'essai	36
4.13	Augmentation de la résistance du béton en compression en fonction du taux de chargement	39
4.14	Banc d'essai de la pile 02	39
4.15	Instrumentation externe de la pile 02	40
4.16	Force d'impact d'un camion 356 kN à 80 km/h à l'échelle 1 : 6	41
4.17	Cas de chargement pile 02 : réponse dynamique du chevêtre	41
5.1	Modèles numériques LS-DYNA	44
5.2	Modèle 72R3 : interpolation de l'endommagement entre les plans de rupture	46
5.3	Comparaison du confinement du matériau 72R3 de LS-DYNA avec le modèle Cusson-Paultre	48
5.4	Modèle numérique de la validation de la courbe M- Φ en fonction de la charge axiale	49

5.5	Comparaison de la courbe $M-\Phi$ numérique avec le modèle Cusson-Paultre .	49
5.6	Maillage des éléments en béton (Pile 02)	51
5.7	Armature du modèle numérique (Pile 01)	53
5.8	Confinement des éléments solides	54
5.9	Courbe force-déplacement des ancrages	55
5.10	Comportement du glissement des barres d'armature lisses selon la littérature	57
5.11	Comportement du glissement des barres d'armature lisses du modèle LS-DYNA	57
5.12	Structure de chargement du modèle 1	59
5.13	Chargement du modèle 1	60
5.14	Modélisation de la superstructure	61
5.15	Structure de chargement du modèle 2.2	61
5.16	Chargement modèle 2.2	62
5.17	Modes d'hourglass	63
5.18	Conditions limites (Pile 02)	64
6.1	Graphique de l'énergie d'hourglass du modèle 1	65
6.2	Graphique de l'énergie cinétique des pièces du modèle 1	66
6.3	Graphique de l'énergie globale du modèle 1	67
6.4	Endommagement du poteau 1 de la pile 01 suite à l'essai	69
6.5	Endommagement du poteau 2 de la pile 01 suite à l'essai	70
6.6	Endommagement du modèle numérique 1	71
6.7	Graphique des résultats de la jauge 10 de l'essai 1	72
6.8	Graphique des résultats de la jauge 20 de l'essai 1	73
6.9	Graphique des résultats de la jauge 14 de l'essai 1	73
6.10	Graphique des résultats de la jauge 24 de l'essai 1	74
6.11	Graphique des résultats de la jauge 15 de l'essai 1	74
6.12	Graphique des résultats de la jauge 25 de l'essai 1	75
6.13	Graphique de la rotation du poteau 1 bas de l'essai 1	76
6.14	Graphique de la rotation du poteau 1 haut de l'essai 1	77
6.15	Graphique de la rotation du poteau 2 bas de l'essai 1	77
6.16	Graphique de la rotation du poteau 2 haut de l'essai 1	78
6.17	Graphique du déplacement vertical du poteau 1 bas de l'essai 1	78
6.18	Graphique du déplacement vertical du poteau 1 haut de l'essai 1	79
6.19	Graphique du déplacement vertical du poteau 2 bas de l'essai 1	79
6.20	Graphique du déplacement vertical du poteau 2 haut de l'essai 1	80
6.21	Comparaison de la courbe d'hystérésis du modèle 1 et de l'essai 1 : premiers cycles	82
6.22	Comparaison de la courbe d'hystérésis du modèle 1 et de l'essai 1 : essai complet	82
6.23	Graphique de l'énergie d'hourglass du modèle 2.1	84
6.24	Graphique du déplacement, de la vitesse et de l'accélération du chevêtre en fonction du temps du modèle 2.1	86
6.25	Endommagement du modèle 2.1	87
6.26	Graphique de l'énergie d'hourglass du modèle 2.2	88

6.27	Graphique de l'énergie interne du modèle 2.2	89
6.28	Propriétés quasi-statiques de la pile	90
6.29	Commande vs réponse du vérin	92
6.30	Endommagement du poteau 1 de la pile 02 suite à l'essai	94
6.31	Endommagement du poteau 2 de la pile 02 suite à l'essai	95
6.32	Endommagement du modèle numérique 2.2	96
6.33	Fonction de transfert et transfert inverse du filtre de l'acquisiteur	97
6.34	Validation de l'amplification des résultats de l'acquisiteur	99
6.35	Précision de la jauge 26 dans le modèle LS-DYNA	100
6.36	Graphique des résultats de la jauge 10 de l'essai 2	102
6.37	Graphique des résultats de la jauge 14 de l'essai 2	102
6.38	Graphique des résultats de la jauge 15 de l'essai 2	103
6.39	Graphique des résultats de la jauge 20 de l'essai 2	103
6.40	Graphique des résultats de la jauge 24 de l'essai 2	104
6.41	Graphique des résultats de la jauge 25 de l'essai 2	104
6.42	Graphique du taux de déformation des armatures	105
6.43	Graphique de la rotation du poteau 1 bas de l'essai 2	107
6.44	Graphique de la rotation du poteau 1 haut de l'essai 2	108
6.45	Graphique de la rotation du poteau 2 bas de l'essai 2	108
6.46	Graphique de la rotation du poteau 2 haut de l'essai 2	109
6.47	Graphique du déplacement vertical du poteau 1 bas de l'essai 2	109
6.48	Graphique du déplacement vertical du poteau 1 haut de l'essai 2	110
6.49	Graphique du déplacement vertical du poteau 2 bas de l'essai 2	110
6.50	Graphique du déplacement vertical du poteau 2 haut de l'essai 2	111
6.51	Graphique de la force en fonction du temps	113
6.52	Courbes d'hystérésis de l'essai 2 et du modèle 2.2	114
6.53	Graphique de l'énergie dissipée lors de l'essai 2	115
6.54	Diagrammes des efforts axiaux	118
6.55	Diagramme des moments fléchissant	118
6.56	Courbe d'interaction M-N	120
6.57	Comparaison des courbes d'hystérésis des essais 1 et 2	122
A.1	Coupe de la super-structure	125
C.1	Graphique des résultats de la jauge 10	187
C.2	Graphique des résultats de la jauge 11	188
C.3	Graphique des résultats de la jauge 12	188
C.4	Graphique des résultats de la jauge 13	189
C.5	Graphique des résultats de la jauge 14	189
C.6	Graphique des résultats de la jauge 15	190
C.7	Graphique des résultats de la jauge 16	190
C.8	Graphique des résultats de la jauge 20	191
C.9	Graphique des résultats de la jauge 21	191
C.10	Graphique des résultats de la jauge 22	192
C.11	Graphique des résultats de la jauge 23	192

C.12	Graphique des résultats de la jauge 24	193
C.13	Graphique des résultats de la jauge 25	193
C.14	Graphique des résultats de la jauge 26	194
C.15	Graphique des résultats de la jauge 10	195
C.16	Graphique des résultats de la jauge 11	196
C.17	Graphique des résultats de la jauge 12	196
C.18	Graphique des résultats de la jauge 13	197
C.19	Graphique des résultats de la jauge 14	197
C.20	Graphique des résultats de la jauge 15	198
C.21	Graphique des résultats de la jauge 20	198
C.22	Graphique des résultats de la jauge 21	199
C.23	Graphique des résultats de la jauge 22	199
C.24	Graphique des résultats de la jauge 23	200
C.25	Graphique des résultats de la jauge 24	200
C.26	Graphique des résultats de la jauge 25	201
C.27	Graphique des résultats de la jauge 26	201
C.28	Graphique des résultats de la jauge 17	202
C.29	Graphique des résultats de la jauge 18	203
C.30	Graphique des résultats de la jauge 19	203
C.31	Graphique des résultats de la jauge 27	204
C.32	Graphique des résultats de la jauge 28	204
C.33	Graphique des résultats de la jauge 29	205

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Liste de collisions graves survenue aux États-Unis	1
1.2	Liste de collisions survenues récemment au Québec	2
4.1	Relations de similitude de Cauchy	23
4.2	Propriétés de la superstructure	24
4.3	Propriétés des barres d'armature 6,35 mm de la pile 01	25
4.4	Propriétés statiques des barres d'armature 6,35 mm de la pile 02	33
4.5	Propriétés statiques des barres d'armature 10M de la pile 02	33
4.6	Propriétés dynamiques des barres d'armature 6,35 mm de la pile 02	33
4.7	Propriétés du béton de la pile 02	37
4.8	Propriétés dynamiques en compression du béton	37
5.1	Unités du modèle LS-DYNA	44
5.2	Propriétés des éléments contacts type tiebreak pour une interface béton-béton	52
5.3	Paramètres du matériau acier	52
5.4	Propriétés des éléments contacts pour une interface armature-béton	58
6.1	Précision des jauges du modèle LS-DYNA	98
6.2	Énergie dissipée lors de l'essai	115
6.3	Propriétés des modèles LAS	117
6.4	Comparaisons de l'amplification des résultats à la limite élastique	119
A.1	Masse de la superstructure	125
A.2	Recette de béton de la pile 01	126
A.3	Recette de béton de la pile 02, colonnes et chevêtre	126

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

D'une année à l'autre, l'achalandage du réseau routier ainsi que la quantité et les dimensions des marchandises transportées augmentent. Le réseau routier est donc primordial pour l'économie et le développement d'un pays. Il arrive régulièrement qu'un véhicule heurte un pont. En effet, la quantité de collisions de ce type est estimée à 200 par année dans l'état de New York [Agrawal *et al.*, 2011]. Ces impacts peuvent considérablement endommager une structure. Entre 1989 et 2000, l'impact d'un véhicule est la 2e cause d'effondrement d'un pont aux États-Unis avec 59 des 503 cas répertoriés [Wardhana et Hadipriono, 2003].

En plus d'endommager la structure, un tel événement peut engendrer d'autres inconvénients. Notamment, la fermeture à court ou long terme des routes passant sous et sur l'ouvrage, une importante congestion du réseau routier à proximité ainsi que tous les impacts sociaux et économiques reliés à cet accident. Le tableau 1.1 présente une liste non exhaustive de collisions ayant causé de lourds dommages et le tableau 1.2 présente une liste de collisions survenues récemment au Québec. Parmi ces exemples, le viaduc du chemin du Fer-à-Cheval à Sainte-Julie démontre bien les inconvénients engendrés par ce type d'accident. Son tablier a été heurté à plusieurs reprises par des camions excédant la hauteur permise. Le 6 juillet 2011, plusieurs poutres ont été endommagées suite à l'impact d'un camion dont la hauteur était non réglementaire. La largeur du viaduc a été réduite et une

Tableau 1.1 Liste de collisions graves survenue aux États-Unis

Endroit	Pont	Année	Type de collision	Dommages
Evergreen, Al	Interstate 65	1993	Bétonnière avec un pilier	2 morts 2 portées détruites
Corsicana, Tx	Interstate 45	2002	Camion remorque avec un pilier	1 mort Effondrement du viaduc
Big Spring, Ne	Interstate 80	2003	Camion remorque avec un pilier	1 mort Effondrement du viaduc
Corpus Christi, TX	Tancahua St.	2004	Camion remorque avec un pilier	1 mort Poteau détruit

Tableau 1.2 Liste de collisions survenues récemment au Québec

Endroit	Pont	Année	Type de collision	Dommages
Québec	Aut. Henri IV	2011	Équipement sur un fardier avec la structure	1 barre d'armature arrachée
Ste-Julie	Aut. 20	2011	Camion hors normes avec la superstructure	Superstructure très endommagée Aucune accumulation de neige permise
Sherbrooke	St-Francis	2012	Camion de matériaux et superstructure	Déplacement de la superstructure de 60 cm
Québec	Aut. 40	2013	Camion hors normes avec la superstructure	1 poutre en acier endommagée

glissière en béton a été installée pour éviter toute circulation sur les poutres endommagées [Boulet, 2011]. Ce viaduc est le seul lien qui permet de traverser l'autoroute 20 séparant la ville de Sainte-Julie en deux. De plus, aucune accumulation de neige supérieure à 20 cm n'était permise sur la partie endommagée de la structure. Le viaduc a finalement été reconstruit à l'été 2012 [Aldea *et al.*, 2013].

1.2 Problématique

Face à la récurrence de ces événements et aux dommages causés par les collisions, il faut se questionner sur la validité des normes de conception. Le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CSA-S6-06 et CSA-S6-14) de l'Association canadienne de normalisation, ainsi que la norme américaine AASHTO Load and Resistance Ractor Design bridge design specifications (AASHTO LRFD) de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) contiennent des exigences sur la conception de la pile d'un pont soumise à l'impact d'un bateau, d'une barge et d'un camion. Cependant, la charge d'impact de dimensionnement indiquée par la norme canadienne est moins sévère que la norme américaine. De plus, une récente étude conclut que les efforts fournis par l'AASHTO sous-estiment l'effort engendré par l'impact d'un camion sur la pile d'un pont [Agrawal *et al.*, 2011]. Finalement, d'importantes études ont récemment analysé les charges d'impacts d'une barge et des recommandations ont été émises face à la norme. Peu d'études abordent les impacts causés par un camion. Les seules études effectuées consistent en des analyses par éléments finis, mais aucun essai en laboratoire n'a été effectué.

Face à tous ces événements et aux conclusions des plus récentes études, il est primordial d'approfondir le sujet. Les prochaines pages comportent donc une revue de l'état de l'art ainsi que les objectifs et la méthodologie du projet de recherche envisagé.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Normes

2.1.1 Pont

Véhicules

La norme canadienne (CSA-S6-06 et CSA-S6-14) et américaine (AASHTO) évaluent la charge d'impact par une méthode statique équivalente. Cette méthode consiste à appliquer une charge statique au lieu d'un impact pour engendrer des efforts représentatifs de la réponse dynamique du système. La charge statique équivalente indiquée dans l'AASHTO est de 1800 kN tandis que celle précisée par la CSA-S6-06 et CSA-S6-14 est de 1400 kN. Dans la norme canadienne, la charge doit être appliquée à 1,2 m au-dessus du niveau de sol avec un angle de 10° par rapport au sens de la circulation. La charge d'impact s'applique si la pile est située à moins de 10 m du bord d'une chaussée. La force appliquée provient de la norme allemande DIN 1072 (1972) et a été calculée avec l'impact d'un camion de 450 kN [Association canadienne de normalisation, 2006b].

Pour valider la valeur de la charge occasionnée, une étude a analysé par éléments finis un impact entre deux types de véhicules sur deux piliers d'un pont existant [El-Tawil *et al.*, 2005]. Les deux véhicules utilisés lors des analyses numériques sont une camionnette Chevrolet C2500 de 14 kN ainsi qu'un petit camion de type Ford de 66 kN. Ces modèles par éléments finis ainsi que d'autres véhicules sont disponibles gratuitement sur le site de la National Crash Analysis Center (NCAC) (www.ncac.gwu.edu). La figure 2.1 présente les résultats de la force d'impact en fonction de la vitesse du camion Ford pour les piles 1 et 2. La figure 2.2 présente les mêmes résultats, mais avec le camion de type Chevrolet. Les résultats démontrent que les deux véhicules engendrent des forces statiques équivalentes supérieures à la norme de l'AASHTO. Il faut aussi considérer que les piles étudiées lors de cette étude font partie d'un échangeur. Elles sont très hautes et élancées comparativement aux ponts typiques retrouvés au Québec. Mais, d'un autre côté, les véhicules utilisés sont relativement légers. Le camion normalisé (CL-625) utilisé dans la CSA-S6-06 et CSA-S6-14 pour le dimensionnement du tablier pèse 625 kN, soit 9,5 fois plus lourd que le camion Ford utilisé dans cette étude. Un camion standard pèse 357 kN (80 000 lb) à sa charge maximale.

Or, depuis la réalisation de cette étude, un camion semi-remorque de 357 kN et un camion benne de 290 kN (65 000 lb) ont été modélisés. Le projet de recherche envisagé est donc différent de celui réalisé par El-Tawil *et al.* et utilisera la force d'impact d'un modèle de camion semi-remorque de 357 kN et l'utilisation d'une pile d'un pont d'étagement typique québécois.

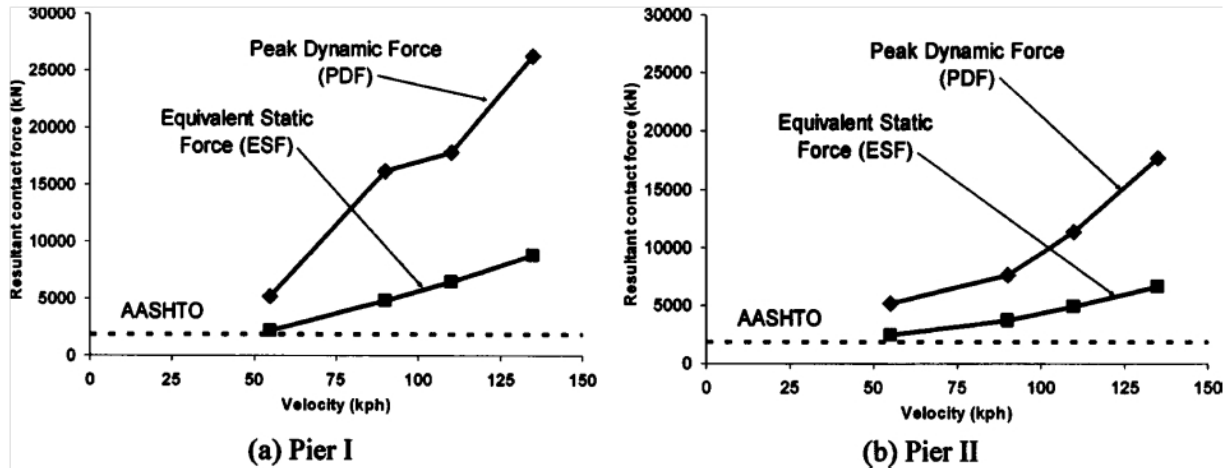


Figure 2.1 Résultat de l'impact d'un petit camion Ford [El-Tawil *et al.*, 2005]

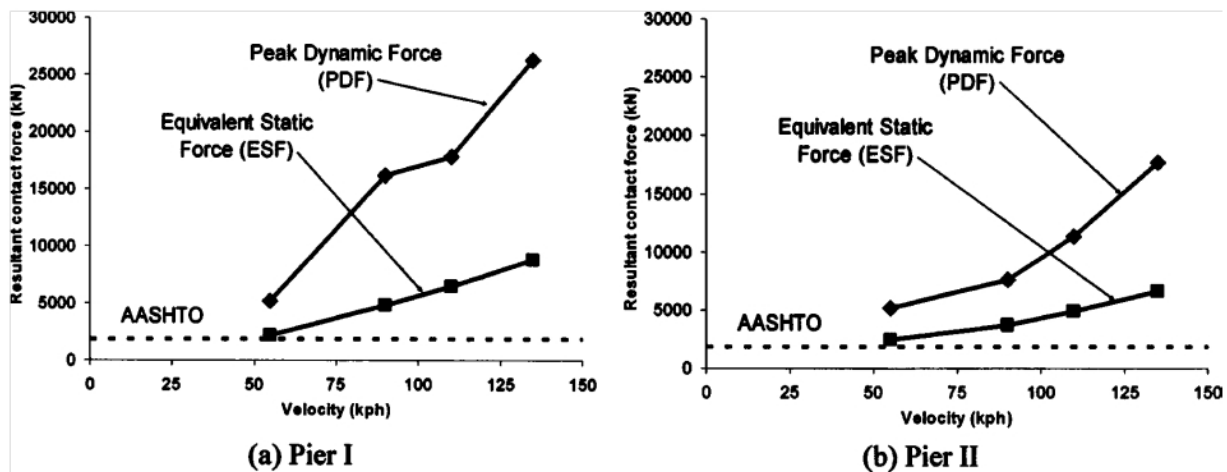


Figure 2.2 Résultat de l'impact d'une camionnette Chevrolet C2500 [El-Tawil *et al.*, 2005]

Barges et bateaux

En ce qui concerne la charge d'impact d'une barge ou d'un navire, la méthode utilisée par la norme canadienne CSA-S6-06 et CSA-S6-14 est tirée de la norme américaine AASHTO. Le calcul de la charge statique équivalente engendrée par l'impact d'un bateau ou d'une barge tient compte de beaucoup plus de facteurs que pour l'impact d'un camion. La charge appliquée sur la structure est calculée à l'aide de l'énergie cinétique du bateau ou de la

barge ainsi que la densité du trafic maritime passant sous le pont. Ceci fait intervenir la masse du navire ou de la barge ainsi que la vitesse moyenne annuelle du cours d'eau et la vitesse moyenne des navires. Ces équations ont été développées à l'aide d'une étude réalisée à la fin des années 50 sur les dommages subis par un navire nucléaire suite à une collision. Les équations ont donc été déterminées à l'aide des données collectées lors des 26 essais de collisions [Consolazio *et al.*, 2006].

Une série d'études ont été réalisées sur la collision d'une barge avec la pile d'un pont par [Consolazio et Cowan, 2003], [Consolazio et Cowan, 2005] et [Consolazio *et al.*, 2006]. Ces travaux de recherches comprennent des analyses de collision par éléments finis ainsi que des collisions réelles entre des barges et les piliers d'un pont. Suite à ces études, une méthode d'analyse simple et plus représentative que celle incluse actuellement par les normes a été proposée [Consolazio *et al.*, 2010]. Les essais grandeur réelle ont démontré une lacune dans la norme américaine de l'AASHTO [Consolazio *et al.*, 2006]. La figure 2.3 présente les forces d'impact en fonction de l'énergie cinétique. On peut remarquer que la majorité des impacts réalisés ont engendré des forces supérieures à celles prescrites par la norme de l'AASHTO.

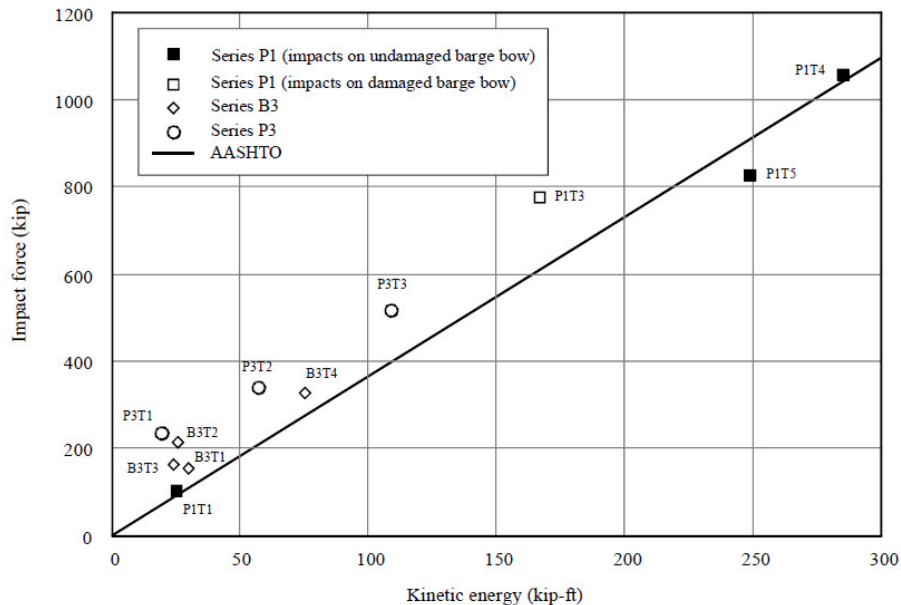


Figure 2.3 Forces d'impact engendrées lors d'essais grandeur réelle [Consolazio *et al.*, 2006]

Parmi les informations recueillies par ces études, il est important de souligner les facteurs affectant l'effort de la charge d'impact sur la structure. Ces facteurs sont la masse, la vitesse et la structure du bateau ainsi que la masse de la superstructure, les dimensions et la géométrie de la pile [Chu et Zhang, 2011]. Étant donné les similarités entre l'impact

d'une barge et l'impact d'un camion sur un pilier de pont, ces études sont une grande source d'information pour les méthodes d'analyses utilisées, le traitement des résultats, les méthodes d'essais ainsi que les conclusions tirées de ces expérimentations.

2.1.2 Bâtiment

Il n'y a aucune exigence concernant les charges d'impacts causées par les véhicules ou les bateaux dans la norme régissant les bâtiments, le Code National du Bâtiment 2015 (CNBC-15). Cependant, l'article 4.1.2.2 stipule que l'ingénieur doit considérer toutes charges non spécifiées s'il y a lieu de croire qu'elle peut survenir. Les efforts de dimensionnements doivent être déterminés avec les informations recueillies par l'ingénieur.

2.2 Méthodes d'analyses statiques

Rapides et simples d'exécution, une méthode statique a, par définition, une vitesse et une accélération nulle. L'équation généralisée du déplacement est donc simple et s'écrit comme suit :

$$Ku(t) = p(t) \quad (2.1)$$

où K est la rigidité, $u(t)$ le déplacement en fonction du temps et $p(t)$ la force en fonction du temps. Lorsque l'on utilise une méthode statique, pour résoudre un problème dynamique, les forces dues à l'inertie et à l'amortissement de la structure sont négligées ou remplacées par une valeur générale non dépendante de la dynamique du système. Seule la rigidité de la structure dicte les efforts internes. Cependant, une méthode statique est souvent utilisée pour sa simplicité et sa rapidité d'exécution. Elle ne requiert pas l'utilisation d'un logiciel spécialisé et, dans les cas simple, elle peut être résolue manuellement.

2.2.1 Méthode statique équivalente

La méthode statique équivalente est celle utilisée dans la norme canadienne et américaine. La norme prescrit une charge à appliquer statiquement qui engendrerait approximativement les mêmes efforts qu'une collision. Il a été observé, lors d'essais d'impact de barges sur une pile, que l'inertie de la superstructure est non négligeable [Getter *et al.*, 2011]. Comme la force maximale de l'impact arrive approximativement 0,2 seconde après l'impact, la superstructure n'a pratiquement pas le temps de se déplacer et la force d'inertie agit comme un appui en haut de la pile. Les conditions d'appuis de la méthode statique sont donc erronées étant donné l'effet de l'inertie de la masse.

2.2.2 Static bracketed impact analysis (SBIA)

Cette méthode a été développée par [Consolazio *et al.*, 2010] suite à un important programme de recherche sur l'impact des barges avec un pilier de ponts. La méthode a été développée à l'aide d'un modèle par éléments finis validé par des essais grandeur réelle d'impact sur un pont désaffecté [Consolazio *et al.*, 2006; Consolazio et Cowan, 2005].

Suite aux essais et aux modélisations, il a été possible de remarquer que les efforts maximaux dus à l'impact d'une barge survenaient principalement à deux moments précis : immédiatement après l'impact dû à l'inertie de la masse de la superstructure et lors de la réponse de la structure au déplacement maximal.

La méthode proposée par [Consolazio *et al.*, 2010] vise à tenir compte de ces deux cas critiques et ainsi éliminer les lacunes de la méthode statique équivalente utilisée dans la norme. Elle consiste à analyser deux cas de chargement appliqués à la pile. Celle-ci est modélisée séparément de la superstructure en ajoutant des ressorts représentant la rigidité de la superstructure et des fondations. Pour le premier cas de chargement, la force d'impact P_B est appliquée au point d'impact et pondérée d'un facteur empirique de 1,45. Une force d'inertie P_I est appliquée en direction opposée de l'impact au niveau de la superstructure. La force d'inertie est déterminée par la force d'impact multiplié par un facteur de résistance à l'inertie IRF (inertial resistance factors). Pour éviter le surdimensionnement, trois facteurs IRF sont calculés. Un facteur est utilisé pour trouver chaque type d'effort correspondant soit le moment et le cisaillement de la pile ainsi que le cisaillement des appuis. Ce cas de chargement permet habituellement d'obtenir les efforts maximaux dans les poteaux et les appuis. Comme la force d'inertie est opposée à la charge d'impact, l'ajout de cette inertie sous-estime le moment de renversement aux fondations. Pour cette raison, le deuxième cas de chargement est constitué seulement de la force P_B majorée par un facteur empirique de 1,85. Ce cas de chargement permet habituellement d'obtenir les efforts maximaux dans les fondations. Les efforts ultimes de dimensionnement sont donc les efforts maximaux des deux cas de chargement. Cette procédure est résumée dans un schéma présenté à la figure 2.4.

2.3 Méthodes d'analyses dynamiques

Les analyses dynamiques sont les méthodes d'analyses les plus complexes, mais aussi celles qui représentent le mieux le comportement d'une structure. Étant donné qu'une charge d'impact est de nature dynamique, le comportement de la structure est fonction de la masse, la rigidité et l'amortissement de la structure. Ces méthodes sont donc complexes

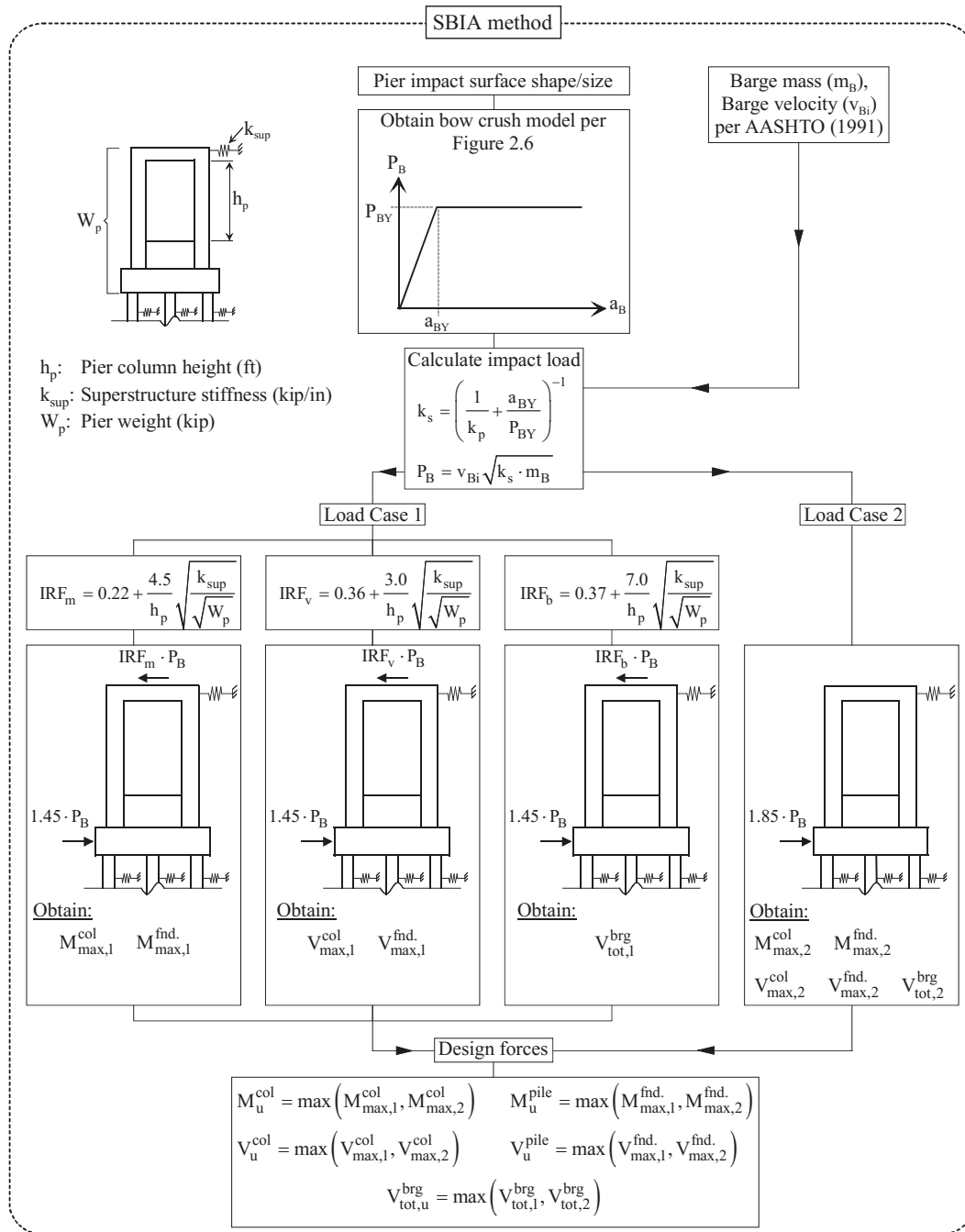


Figure 2.4 Résumé de la Static Bracketed Impact Analysis [Consolazio *et al.*, 2010]

et difficiles à résoudre sans un logiciel spécialisé. L'équation générale du mouvement pour un problème dynamique s'écrit :

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = p(t) \quad (2.2)$$

où M est la masse, C l'amortissement, K la rigidité, $\ddot{u}(t)$ l'accélération, $\dot{u}(t)$ la vitesse, $u(t)$ le déplacement et $p(t)$ la force. Dès qu'une structure est modélisée avec plus d'un degré de liberté dynamique, les analyses dynamiques requièrent l'utilisation des éléments finis. L'équation du mouvement reste la même, mais M , C et K sont des matrices et $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ et $u(t)$ sont des vecteurs.

2.3.1 Superposition modale et spectres d'impact

Spectres d'impact

Un spectre réunit l'ensemble des efforts dus à un chargement en fonction de la période fondamentale de la structure. Plusieurs types de spectres sont utilisés. Le plus connu en génie civil est le spectre d'accélération qui est utilisé dans le domaine du génie parasismique. Il présente l'accélération maximale d'une structure à un degré de liberté en fonction de la période de cette structure pour l'ensemble des tremblements de terre pouvant survenir en un lieu donné. L'utilisation d'un spectre d'impact est envisageable pour déterminer les efforts occasionnés par l'impact d'un camion. Étant donné la nature impulsive de la charge, le spectre utilisé pour une charge d'impact est différent des spectres utilisés dans le domaine du génie parasismique.

Une méthode ainsi qu'un spectre d'impact ont été présentés par Cowan [Cowan, 2007] pour les charges d'impacts d'une barge avec la pile d'un pont. Un deuxième spectre d'impact a été développé par Fan et Yuan [Fan et Yuan, 2012]. Ce deuxième spectre a été développé à partir de la méthode de Cowan, mais en effectuant quelques modifications. Ces deux spectres ainsi que l'analyse par élément fini de Fan et Yuan sont présentés à la figure 2.5. Bien que le spectre de Cowan surestime le facteur d'amplification dynamique comparé au spectre et aux modélisations de Fan et Yuan, il correspond exactement aux résultats de ses analyses. Une comparaison plus approfondie serait nécessaire pour déterminer le spectre représentant le mieux la réalité.

Ce qui suit présente la méthode utilisée par Fan et Yuan. Premièrement, l'impact d'un camion ou d'une barge peut être représenté par un système à deux degrés de liberté présenté à la figure 2.6. Ce système dépend de la masse, de la rigidité et de la vitesse

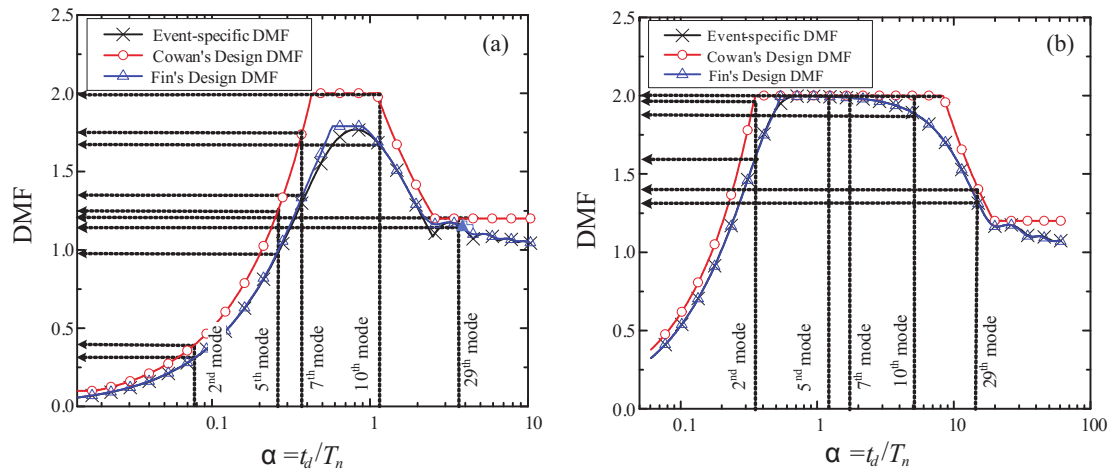


Figure 2.5 Différences entre le spectre de Cowan et de Fan et Yuan, (a) barge de 200 tonnes à 1,0 noeud, (b) barge de 2 030 tonnes à 2,5 noeuds, adapté de [Fan et Yuan, 2012]

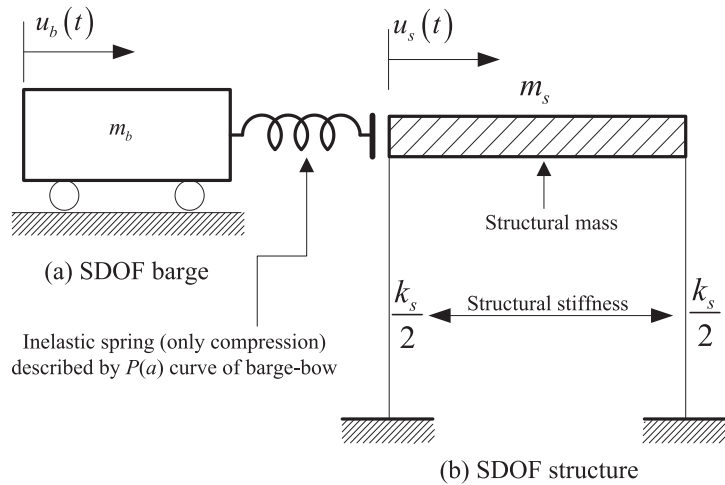


Figure 2.6 Modélisation de l'impact idéalisée avec un système à un degré de liberté dynamique [Fan et Yuan, 2012]

initiale du véhicule ainsi que la masse et la rigidité de la structure. La masse du véhicule est reliée à la structure par un ressort inélastique en compression seulement. Ce ressort représente la partie du véhicule subissant des déformations significatives pour contribuer à la rigidité et la plastification du système. Comme la rigidité est un facteur important lors de la détermination de la force d'impact, les spectres d'impacts cités précédemment sont applicables à l'impact d'une barge de type « jumbo hopper » seulement. Ces spectres ne sont donc pas directement applicables pour l'impact d'un camion, mais la méthode utilisée pour déterminer ce spectre peut être sensiblement la même.

Comme la durée de l'impact est relativement courte comparée à la période de la structure, la force d'impact peut être déterminée en négligeant la réponse de la structure. Deux types de forces impulsives sont présentées à la figure 2.7(a) et (b). Connaissant la force en fonction du temps, il est possible de représenter le système à deux degrés de liberté par un système à un degré de liberté sur lequel est appliquée la force d'impact (figure 2.7(c)). Le spectre d'impact est donc déterminé à partir de ce système et permet d'obtenir le facteur d'amplification dynamique (dynamic magnification factor ou DMF) en fonction d'un rapport α représentant la durée de l'impact t_d sur la période naturelle de la structure T_n . Pour construire ce spectre d'impact, le type de chargement présenté à la figure 2.7(b) a été utilisé. Or, la réponse maximale du système peut arriver lors de la phase II, la phase III ou lors de la réponse de la structure, soit la phase IV. Pour cette raison, le spectre d'impact est construit à l'aide de trois formules présentées ci-dessous. La provenance de ces équations est expliquée en détail dans l'article de Fan et Yuan [Fan et Yuan, 2012].

$$DMF = \begin{cases} 2g(\beta_2, \alpha) \sin(\pi\alpha) + [1 - g(\beta_2, \alpha)] \frac{(1/\alpha)\cos(\pi\alpha)}{1/(2\alpha)^2 - 1} & 0 < \alpha \leq 0,45 \\ a_0(\beta_2)\alpha + DMF(0,45) \leq DMF(0,9) & 0,45 < \alpha < 0,9 \\ \sqrt{\left[\frac{1 - \sin(2\pi\beta_1\alpha)/4\beta_1\alpha}{1 - 1/(4\beta_1\alpha)^2} - 1\right]^2 + \left[\frac{-\cos(2\pi\beta_1\alpha)/4\beta_1\alpha}{1 - 1/(4\beta_1\alpha)^2}\right]^2} + 1 & \alpha \geq 0,9 \end{cases} \quad (2.3)$$

où

$$g(\beta_2, \alpha) = 1,086\alpha^2 - 0,299\alpha + 0,029 + \beta_2 \quad (2.4)$$

$$a_0(\beta_2) = -1,464\beta_2^2 + 0,591\beta_2 + 2,014 \quad (2.5)$$

$\alpha = t_d/T_n$ est le ratio de la durée de l'impact (t_d) sur la période naturelle de vibration (T_n), $\beta_1 = t_y/t_d$ est le ratio de la durée d'augmentation de la charge (t_y) sur la durée de

l'impact et $\beta_2 = t_p/t_d$ est le ratio de la durée de la charge constante (t_p) sur la durée de l'impact. Ce spectre peut sembler long à calculer, mais une fois conçu, ce spectre peut être intégré dans une norme et seulement l'interprétation de celui-ci est nécessaire pour obtenir le facteur d'amplification dynamique.

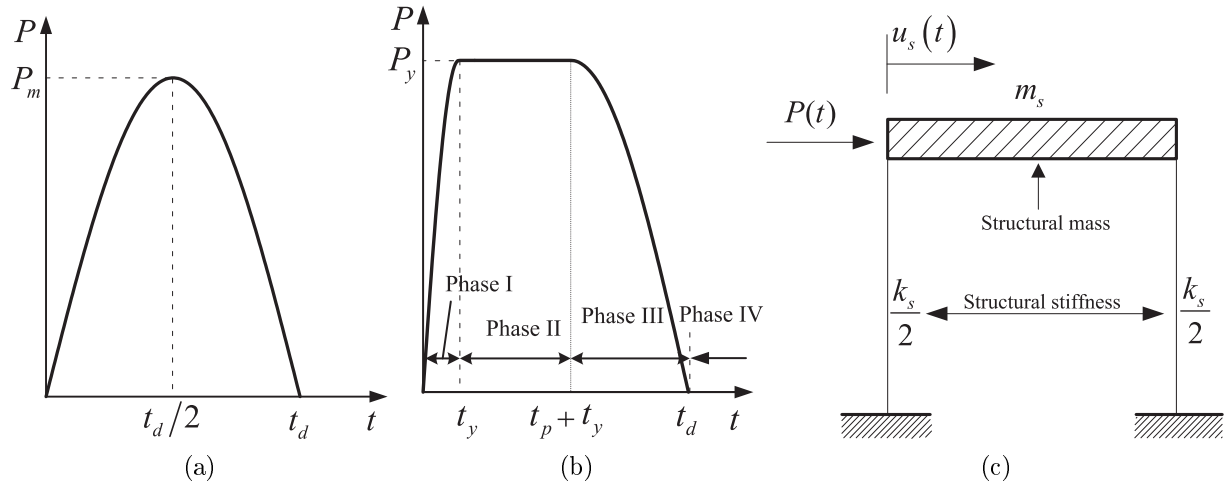


Figure 2.7 Type de forces d'impact et représentation d'un système à un degré de liberté [Fan et Yuan, 2012] : (a) demi-sin, (b) combinatoire, (c) système à 1 DDL

Superposition modale

Une fois le spectre conçu, il est possible d'effectuer une analyse par superposition modale pour trouver les efforts et les déplacements maximaux. L'analyse peut être résumée en 6 étapes présentées ci-dessous. De plus, Fan et Yuan ont présenté un diagramme résumant la procédure de calcul (figure 2.8).

1. Déterminer la charge maximale d'impact (P_m) ainsi que les temps critiques (t_y , t_p , t_d);
2. Analyser le déplacement maximal dû à l'application statique de la charge maximale au point d'impact;
3. Déterminer la période naturelle (T_n) et les modes de vibration (ϕ_n);
4. Transformer le déplacement statique en déplacement modal statique;
5. Calculer les efforts maximaux du i^e mode en effectuant les étapes suivantes pour le nombre de modes i nécessaires :
 - (a) déterminer le facteur DMF_i à partir du spectre d'impact à partir des informations correspondantes T_n , α_i , β_{1i} et β_{2i} ;

- (b) calculer le déplacement dynamique de la structure pour chaque mode ;
 - (c) calculer les efforts internes pour chaque mode à l'aide de la distribution des déplacements de chaque mode.
6. Déterminer les efforts maximaux par superposition modale en utilisant une méthode adéquate.

Concernant l'étape 6, une attention particulière doit être faite lors de la combinaison des forces maximales. Les méthodes les plus connues utilisées dans le domaine du génie parasismique pour la combinaison des efforts maximaux de chaque mode sont la méthode de la combinaison arithmétique (CA), la méthode de combinaison quadratique (CQ ou SRSS en anglais) et la méthode de combinaison quadratique complète (CQC). Or, pour la combinaison des efforts maximaux pour une charge d'impact, la méthode CA surestime les efforts réels et les méthodes CQ et CQC les sous-estiment alors qu'elles donnent de bons résultats pour le génie parasismique [Paultre, 2005]. Ces deux méthodes sont applicables lorsque les réponses maximales de chaque mode ne sont pas de même signe algébrique. L'analyse de l'impact d'une barge sur un pilier a démontré que les réponses maximales des principaux modes sont de mêmes signes algébriques. Dans ce cas, une méthode par superposition linéaire est plus performante. Cette méthode est présentée ci-dessous où r_{mi} est la valeur maximale (déplacement, force, moment...) combinée pour un mode i [Fan et Yuan, 2012].

$$r_m = \left| \sum_{i=1}^N r_{mi} \right| = \left(\sum_{i=1}^N r_{mi}^2 \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

L'analyse par superposition modale est une méthode d'analyse dynamique performante et largement utilisée pour l'analyse des forces sismiques lorsque la méthode simplifiée n'est pas applicable. Pour trouver les modes, une analyse par élément fini doit être faite. La majorité des logiciels de conception utilisés en industrie sont capables d'effectuer ce type d'analyse. Comparée à l'intégration temporelle, la superposition modale est beaucoup moins longue. Cependant, une analyse par superposition modale reste plus complexe et moins accessible qu'une méthode quasi-statique. De plus, beaucoup de ponts courant ont une participation de la masse modale du premier mode plus élevé que 90%. Comme dans le cas des tremblements de terre, l'analyse modale peut être utilisée dans un cas spécial où une méthode simplifiée, comme une méthode statique, ne peut s'appliquer.

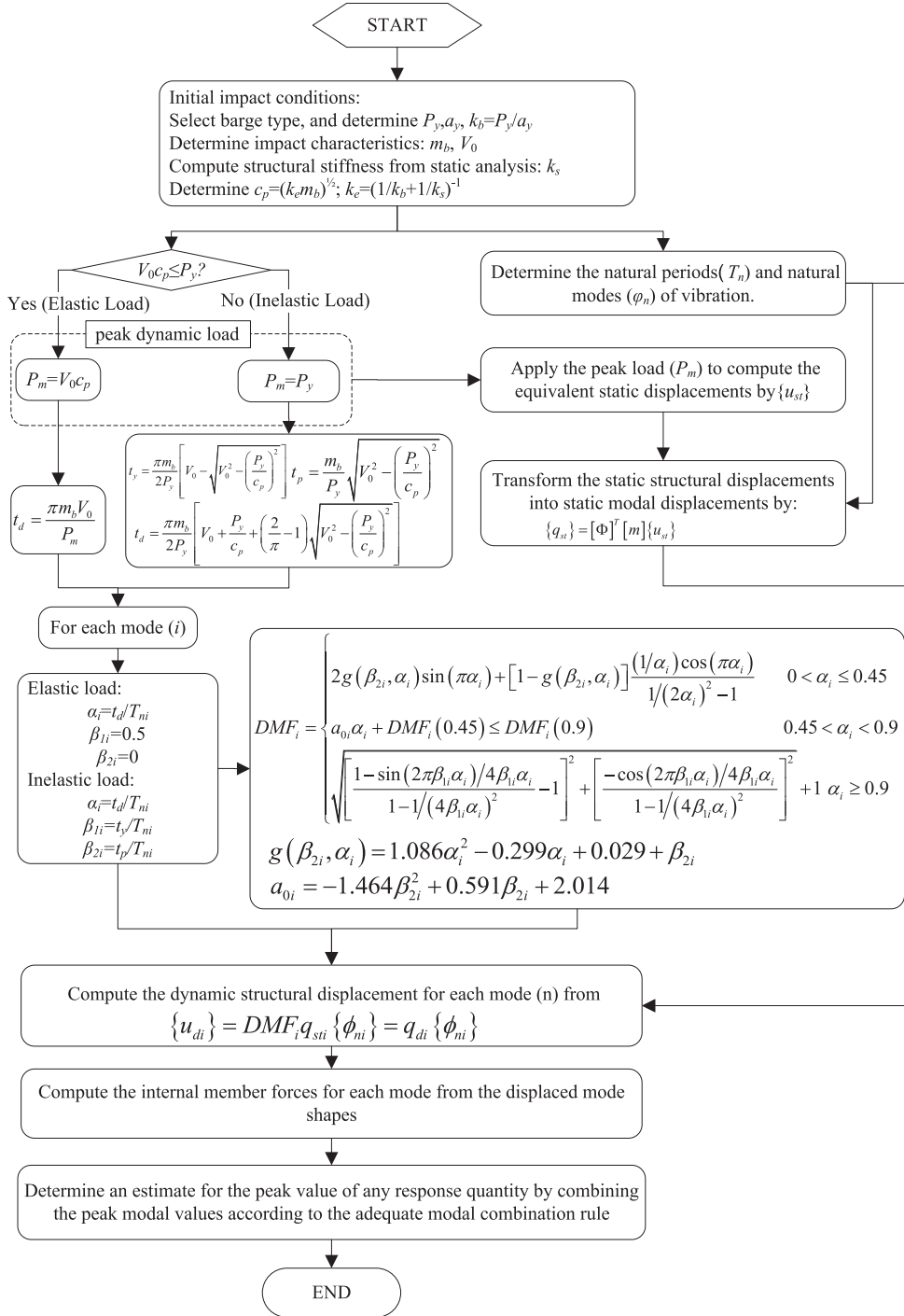


Figure 2.8 Diagramme schématisant la méthode d'analyse par superposition modale [Fan et Yuan, 2012]

2.3.2 Intégration temporelle

Présentation de la méthode

La méthode d'intégration temporelle est probablement la plus complexe et la plus longue des méthodes, mais elle offre une grande liberté pour bien représenter le comportement de la structure. Bien que les logiciels utilisés dans les firmes de génie-conseil utilisent la méthode des éléments finis pour effectuer leurs analyses, des logiciels spécialisés en la matière sont nécessaires. Cependant, ces analyses demandent beaucoup de temps et une grande expertise pour obtenir des résultats cohérents. Pour des modèles complexes, un ordinateur contenant plusieurs coeurs ou l'accès à un super ordinateur est nécessaire pour réaliser les calculs. Pour ces raisons, cette méthode est peu utilisée en industrie, mais elle est utilisée fréquemment en recherche. Plusieurs logiciels par éléments finis sont disponibles : ADINA, ANSYS, LS-DYNA, OpenSees et autres. Pour bien modéliser les charges d'impacts, ces logiciels doivent être capables de représenter fidèlement le comportement non-linéaire inélastique des matériaux, les contacts entre deux pièces, les contacts dans un même élément ainsi que les grands déplacements [Consolazio et Cowan, 2003]. Lors de la conception du modèle par éléments finis, plusieurs choix doivent être faits par l'ingénieur. Par exemple, la méthode d'intégration, les types d'éléments, les types de matériaux, les types de contacts, le maillage du modèle et autres influencent directement la performance du modèle et la validité des résultats. Certains points importants sont discutés ci-dessous.

Les méthodes d'intégration permettent de résoudre l'équation du mouvement présenté plus tôt. Les conditions initiales \ddot{u}_0 , \dot{u}_0 et u_0 sont connues et l'équation est intégrée pour un pas de temps Δt . Il existe principalement deux types de méthodes : implicite et explicite. La première, l'intégration temporelle implicite, résout l'égalité de l'équation des déplacements à un pas de temps $i + 1$, donc $M\ddot{u}^{(i+1)} + C\dot{u}^{(i+1)} + Ku^{(i+1)} = p^{(i+1)}$. Ceci comprend entre autres la méthode de Houbolt, Wilson et Newmark. La deuxième méthode, l'intégration temporelle explicite, résout l'égalité de l'équation des déplacements à un pas de temps i : $M\ddot{u}^{(i)} + C\dot{u}^{(i)} + Ku^{(i)} = p^{(i)}$. Ceci comprend la méthode des différences centrées. Dans le domaine de l'automobile, les méthodes explicites donnent de meilleurs résultats pour des analyses dynamiques non-linéaires d'impact. La méthode implicite peut avoir de la difficulté à converger lors d'un problème fortement non-linéaire comme les impacts de véhicules [Bathe *et al.*, 1997]. Cependant, pour une méthode explicite, le choix de l'incrément de temps Δt est très important. Δt doit être plus petit que $\Delta t_{critique} = T_n/\pi$, où T_n est la plus petite période, sinon le modèle ne convergera pas [Bathe, 2006]. Pour un modèle comprenant plusieurs systèmes, il peut être utile d'utiliser différentes méthodes ou différents pas de temps pour chaque système. Ceci est utile lorsque les deux systèmes

ont des périodes naturelles très différentes [Bathe, 2006]. Par exemple, pour l'impact d'un camion avec une structure, le camion peut être modélisé par une méthode explicite avec un petit pas de temps et la structure par une méthode implicite avec un pas de temps plus grand relié aux propriétés de la structure étudiée.

Le choix du type d'élément fini est très important. La grande différence entre un logiciel de conception par éléments finis et un logiciel d'éléments finis est que ce dernier nous permet de choisir précisément le type d'élément, le maillage, le type de connexions entre chaque élément. Dans le cas d'une analyse avec forte non-linéarité, les éléments doivent être capables de bien représenter les déplacements de grande envergure et permettre aux analyses de converger.

Revue de littérature des analyses par éléments fini

Plusieurs analyses par intégration temporelle ont déjà été réalisées pour étudier l'effet des charges d'impacts sur les structures. Certains modèles sont exhaustifs tandis que d'autres sont simplifiés. On peut regrouper les analyses par éléments finis effectués dans la littérature en deux groupes. Premièrement, les analyses complètes dans lesquelles l'impact du véhicule (camion, barge ou autre) entre en contact directement avec la pile (figure 2.9(a)). Ce modèle est complexe à réaliser, mais représente l'interaction réelle de l'impact avec la structure. Sinon, il est possible de lier les deux systèmes (le véhicule et la structure) par l'intermédiaire d'une force ou d'un ressort non-linéaire en compression seulement représentant la structure du véhicule (figure 2.9(b)). Ceci simplifie quelque peu le modèle. Dans tous ces cas, l'impact du véhicule interagit avec la réponse de la structure. Dans la littérature, ce type d'analyse a été effectué avec des voitures [El-Tawil *et al.*, 2005] et principalement avec des barges [Consolazio et Cowan, 2003], [Sha et Hao, 2012], [Consolazio et Cowan, 2005]. Le deuxième groupe de modélisations néglige l'interaction de la masse du véhicule avec la structure et remplace l'impact par une force appliquée en fonction du temps. Cette force peut être déterminée à l'aide d'un modèle par éléments finis ou d'essais de collisions [Consolazio *et al.*, 2006].

Deux études effectuant des analyses par éléments finis par intégration temporelle d'impact de camion ont été trouvées dans la littérature. La première étude réalisée par El-Tawil *et al.* a été présentée dans la section 2.1 [El-Tawil *et al.*, 2005]. La deuxième étude réalisée par le Texas Transportation Institute [Buth *et al.*, 2010], a pour but de développer un modèle par éléments finis de camion lourd pour simuler l'impact frontal à haute vitesse de ces camions ainsi que d'en déterminer la force d'impact avec un pilier de pont. Cette étude est présentée avec plus de détails dans la section 2.4.

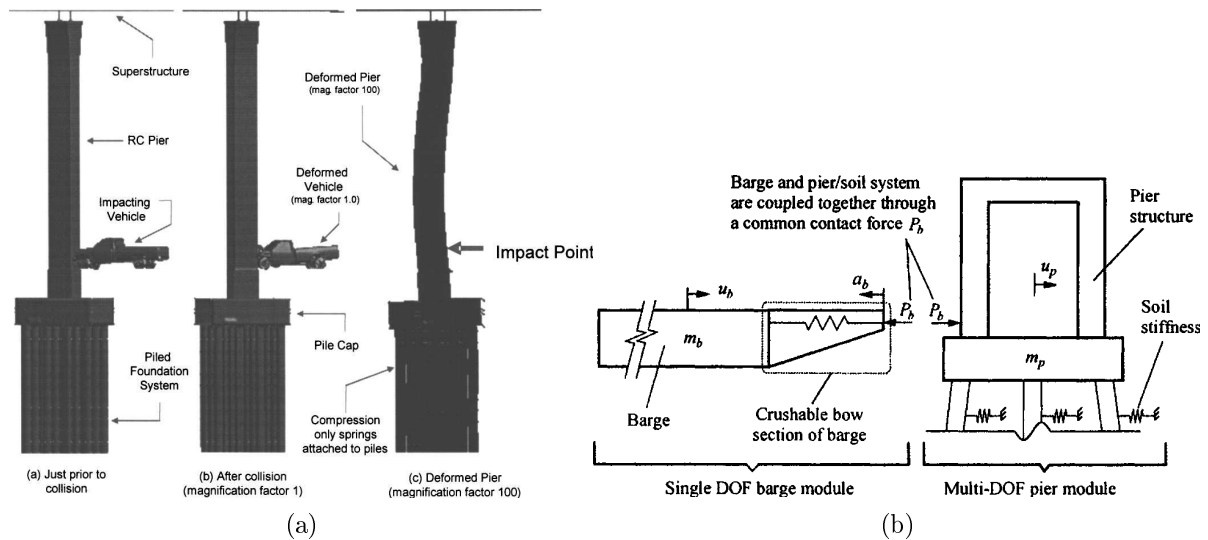


Figure 2.9 Analyse par intégration temporelle : (a) contact direct [El-Tawil *et al.*, 2005], (b) système couplé [Consolazio et Cowan, 2005]

2.4 Caractérisation de la charge d'impact d'un camion

2.4.1 Impacts sur des glissières en béton armé

Étant donné le coût élevé de ces tests, peu d'essais ont été réalisés pour caractériser l'impact d'un camion. Quelques essais d'impacts ont été réalisés pour tester la résistance de glissières en béton armé, mais pour la majorité des tests, le camion n'était pas instrumenté [Plaxico *et al.*, 2009]. Jiang *et al.* présente une liste résumant les impacts grandeur réelle qui ont été réalisés. Ces impacts avec les glissières ont tous un angle d'impact variant de 10° à 25° [Jiang *et al.*, 2004]. Les données recueillies dans cet article sont donc inutilisables pour une collision frontale avec la pile d'un pont étant donné que l'impact s'effectue à angle. Lors de ces impacts, la structure du véhicule est sollicitée différemment engendrant des forces d'impact différentes à une collision frontale. Pour permettre de reproduire facilement les impacts, un camion semi-remorque a été modélisé par éléments finis et calibré à l'aide d'un essai de collision. Ce modèle a été développé par la National Transportation Research Center Inc. (NTRCI) et est disponible sur leur site internet [National Transportation Research Center Inc., 2009]. Cependant, il est indiqué sur ce site que le modèle n'est pas conçu pour représenter des impacts frontaux à haute énergie cinétique comme dans le cas d'une collision avec le pilier d'un pont.

2.4.2 Impacts sur des piles de pont

Aucune étude n'a été trouvée présentant la collision réelle d'un camion avec la pile d'un pont. Une étude réalisée par le Texas Transportation Institute analyse l'impact frontal d'un camion semi-remorque de 357 kN (80 000 lb) et d'un camion benne de 290 kN (65 000 lb) à l'aide de la méthode des éléments finis [Buth *et al.*, 2010]. Ces modèles sont illustrés à la figure 2.10. Le camion semi-remorque a été modélisé par le NTRCI pour les essais sur les glissières en béton armé. Le modèle du camion benne provient du camion Ford modélisé par la National Crash Analysis Center qui a été modifié par le NTRCI pour effectuer des essais sur des glissières en béton armé. Dans les deux cas, les modèles originaux ont été modifiés pour l'étude d'impacts frontaux à haute vitesse.



Figure 2.10 Modèles des camions analysés [Buth *et al.*, 2010] : (a) camion semi-remorque 80 000 lb, (b) camion benne 65 000 lb

Les paramètres analysés dans cette étude sont : le type ainsi que la masse du camion (semi-remorque ou camion benne), le diamètre des poteaux (24", 36" et 48" ou 610 mm, 914 mm et 1219 mm), la vitesse d'impact (40, 50, 60 mph ou 64, 80 et 97 km/h) et le type de cargaison (rigide ou déformable). Suite aux analyses, il est possible de déterminer deux pics sur un graphique de la force en fonction du déplacement comme présenté à la figure 2.11. Le premier point maximal est dû à l'impact causé par le bloc moteur. Par la suite, la structure retenant le bloc moteur plastifie entraînant une diminution de la force. Le deuxième point maximal, et le plus important, arrive lorsque le bloc moteur s'appuie sur la boîte ou la remorque du camion. Cette force est donc due à l'impact de la cargaison avec la pile.

Les conclusions tirées par Buth *et al.* sur les facteurs énumérés précédemment permettent de mieux comprendre les effets de la charge d'impact d'un camion. Tout d'abord, les résultats démontrent que la dimension du poteau affecte peu la force maximale d'impact. Les résultats du camion benne varient de 9 610 kN (2 160 kip) pour un poteau de 48"

(1219 mm) à 11 100 kN (2 490 kip) pour un poteau de 24" (610 mm). Ceci est contraire au comportement observé par Consolazio et Cowan (2003) pour l'impact de barge. Ceci est dû au fait que la structure avant d'une barge est constituée de plusieurs treillis métalliques longitudinaux. Lorsque la pile est plus large, il y a plus de treillis impliqués dans la déformation de la barge donc la force maximale requise pour plastifier ces treillis est plus élevée [Consolazio et Cowan, 2003]. Peu importe la largeur ou la forme du poteau, la force maximale de l'impact d'un camion est dictée par un seul élément, soit l'ensemble de la structure entourant le moteur et la cabine ainsi que la cargaison.

Par la suite, ils ont conclu que la force maximale d'impact en fonction de la vitesse donne une relation linéaire. Le type de cargaison est aussi significatif sur la force maximale d'impact. Une cargaison rigide donne une force d'impact beaucoup plus élevée que la cargaison déformable. Il est à noter que peu importe le type de cargaison, le premier pic causé par le bloc moteur reste sensiblement le même. La différence vient du deuxième pic où le bloc moteur entre en contact avec la remorque ou la boîte contenant la cargaison. Il est possible d'observer ces conclusions sur les graphiques de la force maximale en fonction de la vitesse présentés aux figures 2.12 et 2.13.

Les modèles utilisés dans cette étude n'ont pas été calibrés et aucune donnée n'a été trouvée pour valider les résultats. L'auteur mentionne à la fin du rapport qu'une deuxième phase comportant des essais d'impacts de camions sur un pilier de pont était envisagée pour calibrer le modèle par éléments finis. Cependant, aucune information sur l'avancement des travaux ou l'existence de cette deuxième phase n'ont été trouvées à ce jour.

Il est difficile de comparer les résultats de cette étude avec les valeurs fournies par la norme canadienne ou américaine. Premièrement, les résultats présentés ci-dessus sont des forces d'impact et non des forces statiques équivalentes. Par comparaison, des facteurs d'amplification dynamique empiriques de 1,45 et 1,85 sont imposés sur la charge maximale d'impact d'une barge dans la Static Bracketed Impact Analysis proposée par Consolazio *et al.*. D'autre part, les impacts analysés par Buth *et al.* sont réalisés sur un poteau rigide. Les résultats surestiment donc la force maximale [Buth *et al.*, 2010].

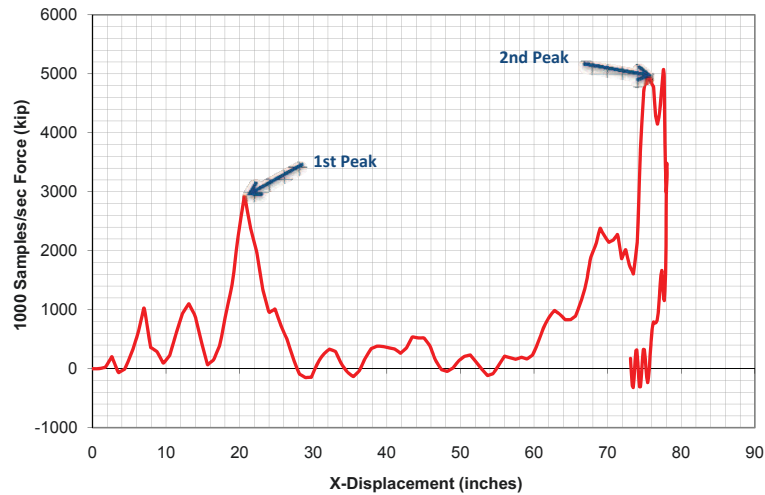


Figure 2.11 Graphique de la force - déplacement pour un impact d'un camion benne, cargaison rigide, 50 mph (80 km/h), poteau de 36" (914 mm) [Buth *et al.*, 2010]

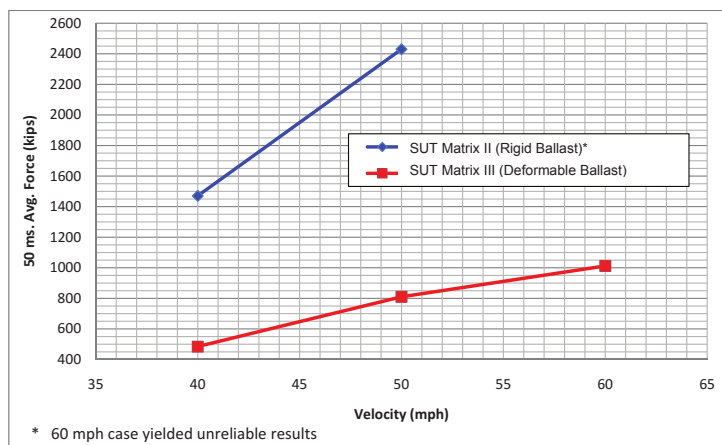


Figure 2.12 Graphique force - vitesse pour un camion benne [Buth *et al.*, 2010]

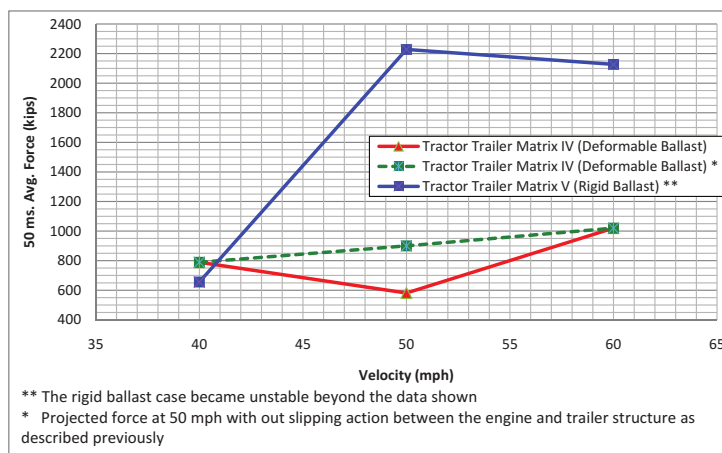


Figure 2.13 Graphique force - vitesse pour un semi-remorque [Buth *et al.*, 2010]

CHAPITRE 3

OBJECTIFS DE RECHERCHE

3.1 Objectifs

La revue de littérature démontre que le critère de conception pour une collision d'un véhicule de la norme canadienne CSA-S6-14 sous-estime les efforts dans la structure. Cependant, les résultats proviennent d'analyses numériques et aucun essai en laboratoire n'a été réalisé pour valider les résultats numériques. D'un autre côté, les critères de conception et la recherche sur les collisions de navire sur un pont sont beaucoup plus développés et disposent de données expérimentales. De ces recherches, une nouvelle méthode de conception quasi-statique prometteuse nommée « static bracketed impact analysis » pourrait inspirer une méthode adaptée aux collisions d'un véhicule.

Le but du projet de recherche est donc d'approfondir davantage nos connaissances sur le phénomène des collisions frontales d'un camion semi-remorque avec la pile d'un pont et de recueillir des résultats tant expérimentaux que numériques. Les objectifs spécifiques sont :

- effectuer un essai expérimental d'un impact en laboratoire ;
- développer et valider un modèle numérique pouvant reproduire des charges d'impact en laboratoire ;
- étudier le comportement du système.

3.2 Méthodologie

Le présent projet est la continuité du travail de Louis Landry-Michaud [Landry-Michaud *et al.*, 2015] réalisé dans le cadre de sa maîtrise. Lors de ses travaux, il a, entre autres, fait la conception des spécimens testés en laboratoire ainsi que le montage pour les essais. Il a conçu et construit un coffrage réutilisable pour couler les spécimens. Il a construit un spécimen et entamé la construction du deuxième. Il a usiné le montage pour les essais. Il a développé, optimisé et construit un mécanisme émulateur de contrôle en force. Ce mécanisme permet de contrôler un vérin hydraulique en force de façon très précise.

En considérant les travaux déjà effectués, les présents travaux de recherche visent à analyser et modéliser l'impact d'un camion semi-remorque sur les spécimens déjà conçus à cet effet. Un premier essai quasi-statique a pour but de caractériser la pile avec un essai répandu en génie civil. Le deuxième essai dynamique représente l'impact d'un camion semi-remorque sur la pile d'un pont. Pour bien représenter ce cas de chargement en laboratoire sans avoir à construire la superstructure, une analyse dynamique par sous-structure utilisant deux vérins est nécessaire. Un premier applique la charge d'impact au niveau de la colonne et un deuxième pour représenter la rigidité et la réponse dynamique de la superstructure. Cependant, avant d'effectuer un essai de cette complexité, il est nécessaire de valider la capacité de réaliser un essai dynamique d'impact selon les vitesses de chargement requises avec un montage simplifié. La charge d'impact est donc appliquée au niveau de la superstructure et parallèle au chevêtre. Cette simplification requiert l'utilisation d'un seul vérin lors de l'essai. La méthodologie est présentée en détail ci-dessous :

1. construire 2 autres spécimens de pile en béton armé à échelle réduite 1 : 6 (pour un total de 3 spécimens) ;
2. effectuer un essai quasi-statique en laboratoire pour caractériser les propriétés statiques de la pile et déterminer la courbe d'hystérésis ;
3. construire un modèle par éléments finis de la pile à échelle 1 : 6 avec LS-DYNA (modèle 1) et le calibrer selon les résultats quasi-statique ;
4. adapter le modèle numérique statique pour des analyses dynamiques et inclure une idéalisation de la superstructure (modèle 2.1) ;
5. déterminer la charge d'impact due à une collision d'un camion semi-remorque à partir des résultats de [Butt *et al.*, 2010]. La charge est limitée à 90% de la force totale pour limiter les déplacements du chevêtre à 40 mm ;
6. simuler l'impact d'un camion semi-remorque sur le chevêtre de la pile à l'aide du modèle numérique 2.1 et utiliser les résultats du déplacement du chevêtre en fonction du temps comme cas de chargement du deuxième essai en laboratoire ;
7. effectuer un essai dynamique en laboratoire selon le cas de chargement préalablement déterminé avec le modèle numérique 2.1 ;
8. calibrer un modèle numérique dynamique (modèle 2.2) avec les résultats du deuxième essai en laboratoire ;
9. analyser les résultats et tirer des conclusions.

CHAPITRE 4

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

4.1 Facteur d'échelle

Les spécimens testés en laboratoire sont construits à l'échelle 1 dans 6. Les relations de similitude de Cauchy sont utilisées pour calculer les propriétés des spécimens à échelle réduite. Le tableau 4.1 présente les facteurs d'échelle utilisés où $\gamma = 6$, l'indice « e » désigne l'échantillon à l'échelle et l'indice « m », le modèle original.

Tableau 4.1 Relations de similitude de Cauchy [Moncarz et Krawinkler, 1981]

Unité	Relation	Unité	Relation
Longueur	$L_e = \gamma^{-1}L_m$	Masse	$M_e = \gamma^{-3}M_m$
Aire	$A_e = \gamma^{-2}A_m$	Force	$F_e = \gamma^{-2}F_m$
Volume	$V_e = \gamma^{-3}V_m$	Pression	$\sigma_e = \sigma_m$
Vitesse	$v_e = v_m$	Déformation	$\epsilon_e = \epsilon_m$
Accélération	$a_e = \gamma a_m$	Temps	$t_e = \gamma^{-1}t_m$
Densité	$\rho_e = 1\rho_m$	Fréquence	$f_e = \gamma f_m$
Module d'élasticité	$E_e = 1E_m$		

4.2 Superstructure

La superstructure étudiée est constituée de 4 poutres précontraintes de type New England bulb-tree (NEBT) 1 400 espacées de 2 200 mm c/c et d'une dalle en béton armé de 200 mm par 8 900 mm. La structure comporte deux portées de 30 m avec un appui fixe au niveau de la pile. Le tableau 4.2 présente les propriétés de la superstructure à l'échelle 1 : 1 et 1 : 6. Par hypothèse, la moitié de la masse de la superstructure est appliquée sur la pile pour les charges gravitaires et d'inerties. Plus de détails sur la superstructure sont présentés à l'annexe A.1.

Tableau 4.2 Propriétés de la superstructure

		1 : 1	Facteur de Cauchy	1 : 6
Masse totale	Tonne	704	$\frac{1}{6^3}$	3,26
Masse à la pile	Tonne	357	$\frac{1}{6^3}$	1,65
Inertie verticale	mm ⁴	$1,27 \times 10^{12}$	$\frac{1}{6^4}$	$9,83 \times 10^8$
Inertie latérale	mm ⁴	$8,39 \times 10^{11}$	$\frac{1}{6^4}$	$6,47 \times 10^8$
Rigidité latérale	kN/mm	4,92	$\frac{1}{6}$	0,821
$h_{\text{centre de gravité}}$	mm	1039	$\frac{1}{6}$	173

4.3 Essai 1

4.3.1 Description du spécimen

Les poteaux du premier échantillon possèdent un diamètre de 165 mm et sont espacés de 540 mm c/c. Ils contiennent 6 barres longitudinales en acier de 6,35 mm de diamètre. L'armature de confinement est une barre d'acier de 6,35 mm de diamètre hélicoïdale avec un pas de 75 mm et un diamètre de 106 mm. L'acier de confinement est prolongé de 1,5 tour dans le chevêtre et deux tours consécutifs sont placés à la base des poteaux. L'armature de confinement n'est donc pas continue dans la semelle. Le chevêtre mesure 1315 x 200 x 200 mm et contient 12 barres d'armature longitudinales en acier de 6,35 mm de diamètre ainsi que 13 cadres en acier de 6,35 mm de diamètre répartis sur la longueur du chevêtre. La semelle mesure 1235 mm de long par 540 mm de large sur 230 mm de hauteur. La semelle est principalement conçue pour fixer la pile à la dalle d'essai et n'est pas étudiée dans ce projet. La pile 01 est illustrée à la figure 4.1 et les plans de construction sont présentés à l'annexe A.3.

4.3.2 Construction du spécimen

Le premier spécimen est coulé en deux étapes, la semelle en premier, les poteaux et le chevêtre en second. Il y a donc un joint de construction entre la semelle et les poteaux. Le béton de la semelle au niveau des joints de constructions est raboteux pour permettre le transfert du cisaillement et la surface est nettoyée et humectée avant la coulée des poteaux. Les mélanges de béton sont faits dans les laboratoires de l'Université de Sherbrooke. Un mélange est nécessaire pour la semelle, deux mélanges pour les poteaux et le chevêtre.

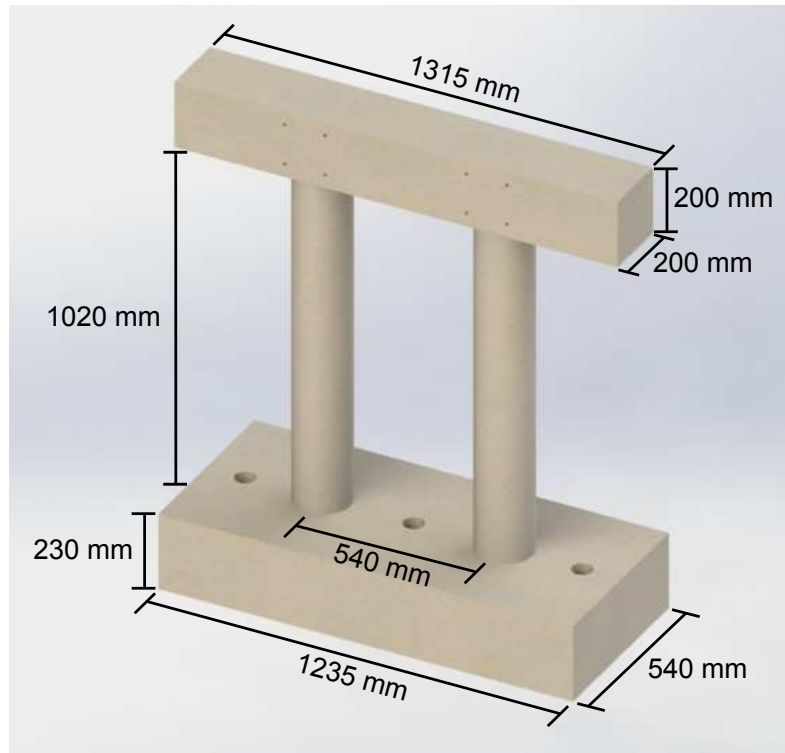


Figure 4.1 Dimensions de la pile 01

4.3.3 Matériaux

Acier

Deux types de barres d'armature avec une limite élastique nominale de 400 MPa sont utilisés : des barres crénelées 10M pour la semelle avec une limite élastique réelle de 467 MPa et des barres lisses de 6,35 mm de diamètre pour l'acier longitudinal et de confinement des poteaux et du chevêtre. Le tableau 4.3 résume les propriétés des barres lisses utilisées et la figure 4.2 les résultats des essais de traction ainsi que l'idéalisation du comportement de l'acier par une courbe bilinéaire. Les résultants sont déterminés en calculant la moyenne de quatre essais de traction.

Tableau 4.3 Propriétés des barres d'armature 6,35 mm de la pile 01

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Moyenne
Diamètre (mm)	6,35				-
Aire (mm ²)	31,7				-
E élastique (MPa)	208300	200700	197600	197300	201000
E plastique (MPa)	1143	1125	1006	776	1013
F_y (MPa)	494	495	495	507	498
F_u (MPa)	546	559	562	579	561

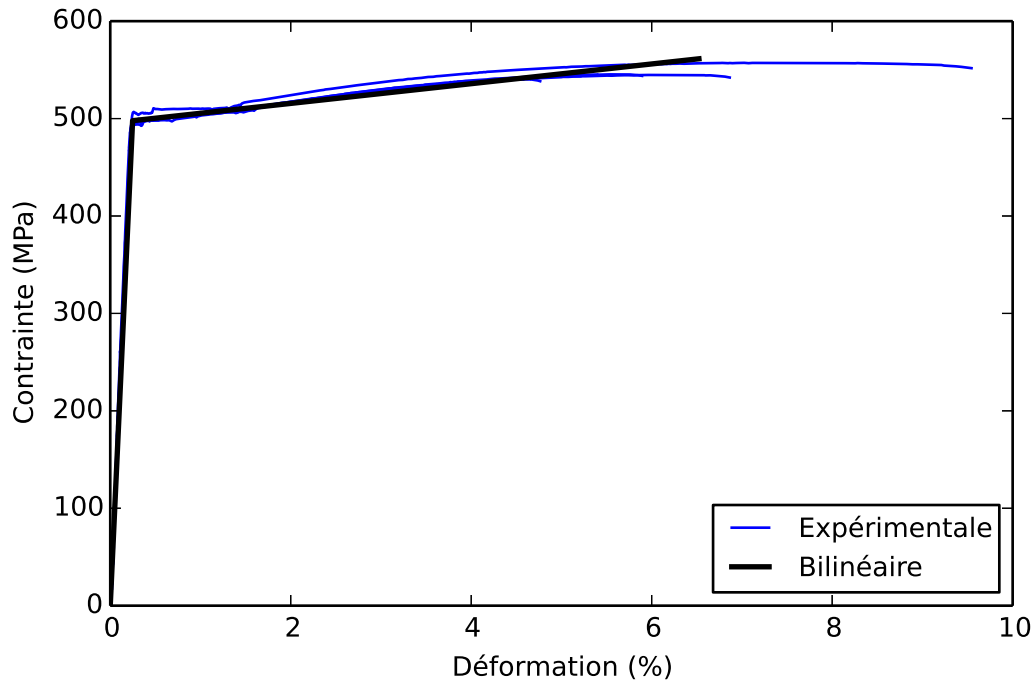


Figure 4.2 Résultats des essais de traction des barres d'armature 6,35 mm de la pile 01

Béton

Le béton utilisé est un mélange typique avec une résistance en compression nominale de 30 MPa. Les essais de compression sont réalisés sur des cylindres 100 mm x 200 mm. Le béton des semelles a une résistance de 32,0 MPa à 28 jours et de 39,3 MPa le jour de l'essai. Le béton des colonnes et du chevêtre a une résistance de 33,0 MPa à 28 jours et 36,6 MPa le jour de l'essai. La figure 4.3 présente les courbes contraintes déformations du béton en compression le jour de l'essai pour le béton utilisé dans le chevêtre et les poteaux. Cette coulée a nécessité deux mélanges identiques. Trois cylindres par mélange sont testés. La figure 4.3 présente donc les trois essais pour les deux mélanges et les résultats représentent la moyenne de ces six cylindres. Tous les tests de caractérisation du béton sont réalisés selon la norme CSA-A23.2-09 de l'Association canadienne de normalisation.

4.3.4 Banc d'essai

L'essai est réalisé dans le laboratoire FCI (Fondation canadienne pour l'innovation) de l'Université de Sherbrooke. Le spécimen est fixé à la dalle d'essai avec 3 barres d'ancrage en acier Stressproof de 38,1 mm de diamètre. Un coulis cimentaire est placé entre la semelle de l'échantillon et la dalle d'essai pour assurer un contact uniforme.

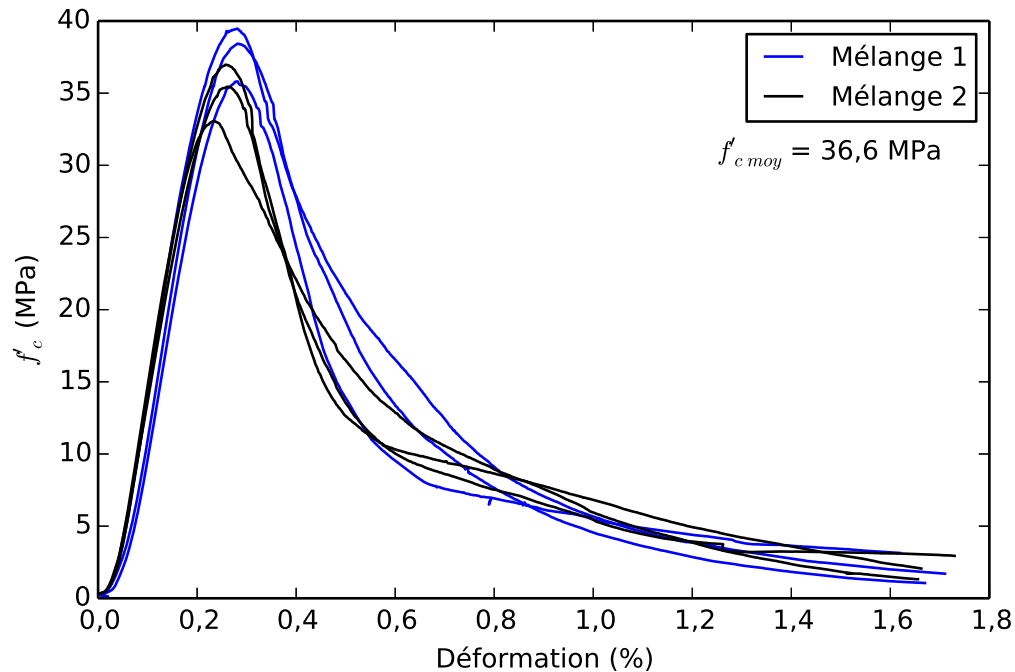


Figure 4.3 Résultats des essais de compression du béton de la pile 01 le jour de l'essai

Le déplacement est imposé par un vérin hydraulique de 250 kN de marque MTS. Le vérin est fixé sur le chevêtre de la pile. Une structure de guidage est installée pour éviter que le chevêtre se déplace en dehors de l'axe de chargement. Des rouleaux en acier sont installés pour réduire le frottement au cas où le chevêtre entrerait en contact avec la structure de guidage. En raison de la configuration de l'échantillon et du laboratoire, aucune charge axiale n'est appliquée sur les poteaux pour ce test en particulier. Le banc d'essai est illustré à la figure 4.4.

Pour mesurer les efforts et les déformations dans la pile, celle-ci est munie d'une série de jauges, potentiomètres, LVDT et d'une cellule de force. 14 jauges de déformations sont fixées sur les barres d'armature comme illustrées à la figure 4.6. Chaque poteau est muni de deux anneaux chacun muni de quatre potentiomètres. Ces anneaux instrumentés permettent de mesurer la rotation et le déplacement vertical des poteaux. Une rosette composée de 5 LVDT est installée sur le chevêtre vis-à-vis chaque colonne pour calculer les efforts dans le béton au niveau du chevêtre. Un potentiomètre est installé sur la semelle pour s'assurer que celle-ci ne glisse pas par rapport à la dalle d'essai. Un potentiomètre est fixé sur le chevêtre pour mesurer le déplacement de celui-ci en plus du potentiomètre interne du vérin. Finalement, la force appliquée sur la pile est mesurée à l'aide de la cellule de force du vérin hydraulique. La figure 4.5 présente la disposition de l'instrumentation externe de la pile.

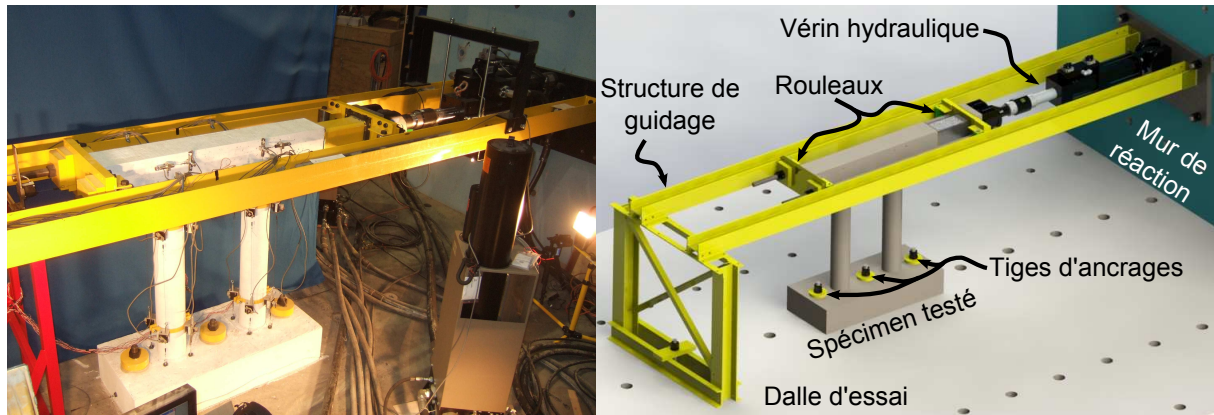


Figure 4.4 Banc d'essai de la pile 01

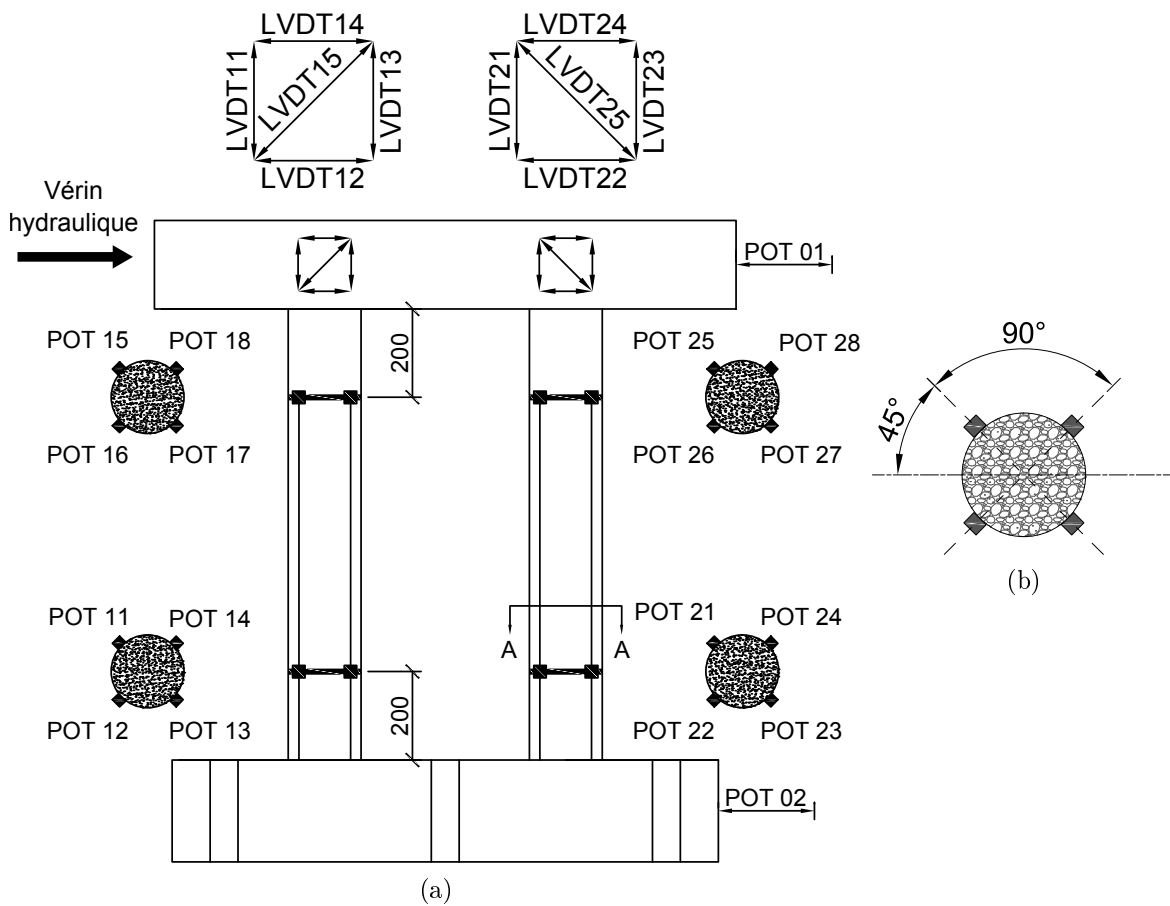


Figure 4.5 Instrumentation externe de la pile 01 : (a) vue en élévation de la pile 01, (b) coupe A-A : potentiomètres des anneaux

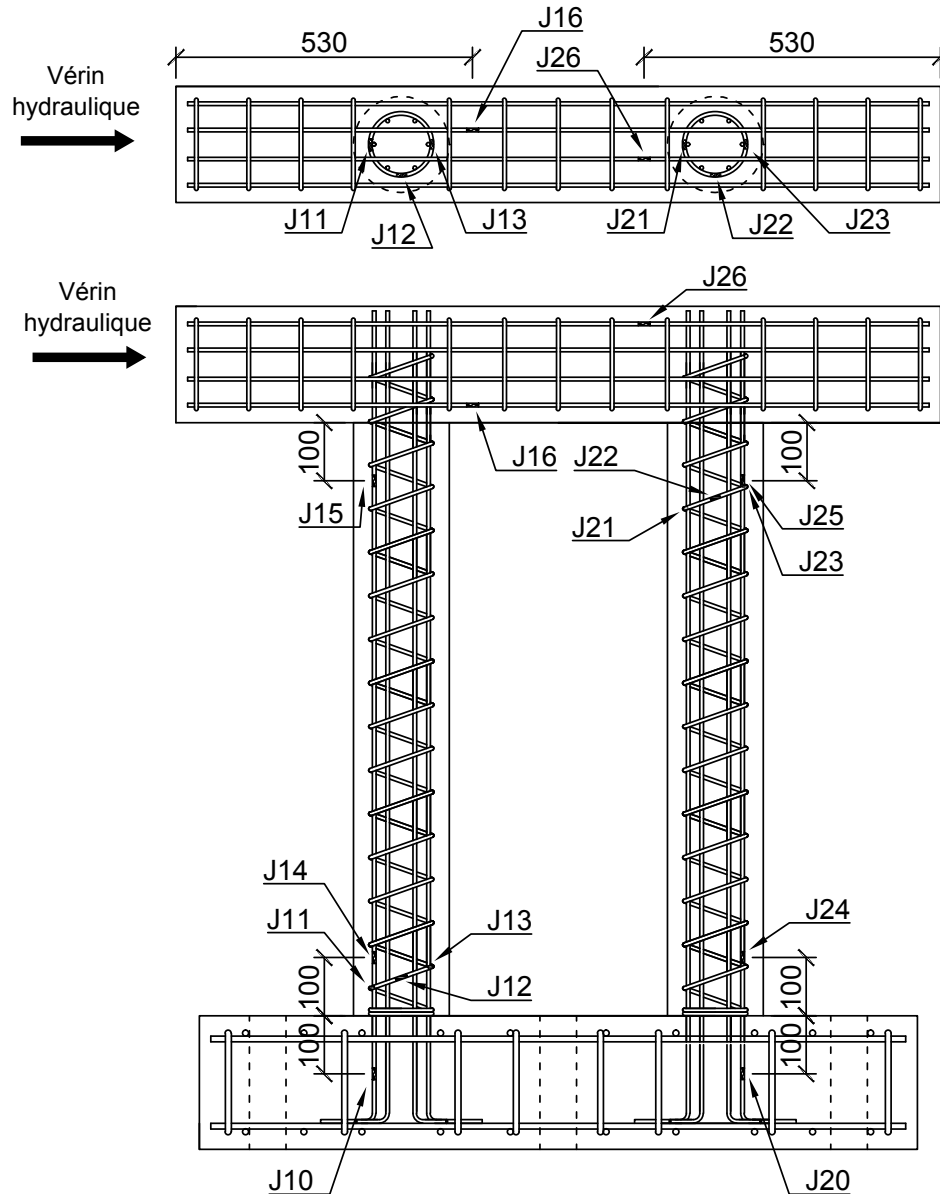


Figure 4.6 Emplacement des jauges sur les barres d'armature

4.3.5 Cas de chargement

L'essai consiste à un chargement cyclique quasi-statique imposé au niveau du chevêtre. Le vérin hydraulique est contrôlé en déplacement avec un potentiomètre externe fixé au chevêtre. Une vitesse de $0,03 \text{ mm/s}$ au niveau du chevêtre permet de maintenir un taux de chargement inférieur à $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ dans les barres d'armature pour considérer l'essai quasi-statique [Fu *et al.*, 1991].

L'essai se déroule comme suit : un premier cycle avec un déplacement maximal de 75 % de la limite élastique théorique ($0,75\Delta_{y \text{ théorique}}$) a pour but de fissurer la structure. Le dé-

placement correspondant à la limite élastique réelle de la pile (Δ_y) est trouvé en imposant un déplacement et en observant en temps réel le comportement de la courbe force déplacement du vérin hydraulique. Une fois Δ_y atteint, un chargement cyclique est incrémenté de $1\Delta_y$, $1,5\Delta_y$, $2\Delta_y$, $3\Delta_y$, \dots , $n\Delta_y$ en répétant deux fois le cycle pour chaque incrément. L'essai est arrêté lorsqu'il y a rupture de la pile ou lorsque le déplacement maximal du vérin hydraulique est atteint. La rupture de la pile est caractérisée par la rupture d'une barre d'armature ou une diminution significative de la charge maximale entre deux cycles.

À l'aide d'analyses préliminaires, le Δ_y théorique trouvé est de 2,1 mm. Au début de l'essai, le Δ_y exp trouvé est de 2,35 mm et le chargement est effectué en fonction de cette valeur. Après l'analyse des résultats, la valeur de 2,35 mm s'est avérée erronée et un nouveau Δ_y exp de 4,9 mm est défini pour le traitement des données. Le chargement a donc été réalisé par incrément de $0,480 \Delta_y$. Pour réaliser l'essai dans un temps raisonnable, la vitesse de chargement est augmentée à 0,06 mm/s et 0,09 mm/s à partir des cycles 14 ($3,35 \Delta_y$) et 18 ($4,32 \Delta_y$) respectivement. De plus, un seul cycle par Δ_y est imposé à la pile à partir du cycle 20 ($4,80 \Delta_y$). Le cas de chargement imposé à la pile 01 est présenté à la figure 4.7. Après le 27^e cycle ($8,15 \Delta_y$), la pile 01 ne présente toujours pas de signe de rupture, l'essai s'est donc terminé avec un « push over » pour trouver la force et le déplacement ultime de la pile.

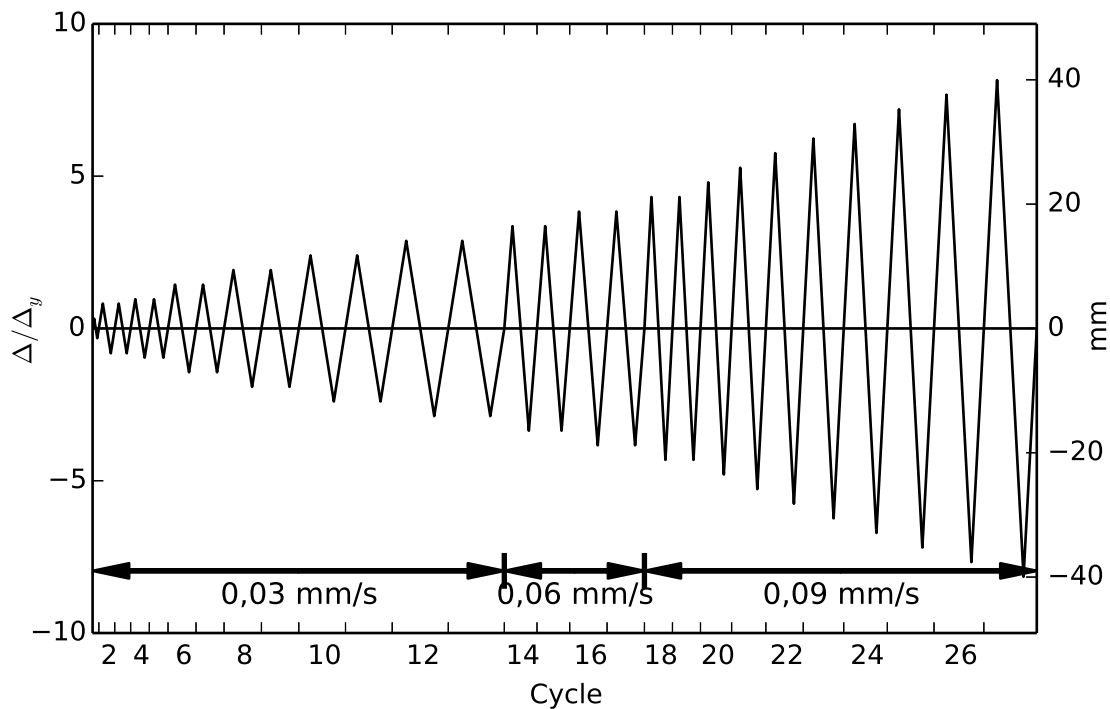


Figure 4.7 Chargement imposé à la pile 01

4.4 Essai 2

4.4.1 Description du spécimen

Le deuxième spécimen testé est similaire au premier. Les poteaux de 165 mm de diamètre sont espacés à 500 mm c/c au lieu de 540 mm et la semelle est de plus grande dimension : 1730 mm x 1230 mm x 230 mm. La nouvelle configuration de la semelle et des poteaux facilite l'application de la charge axiale sur les poteaux. De plus, l'armature de confinement des poteaux se prolonge de 1,5 tour dans la fondation. La pile 02 est illustrée à la figure 4.8 et les plans de construction sont présentés à l'annexe A.3.

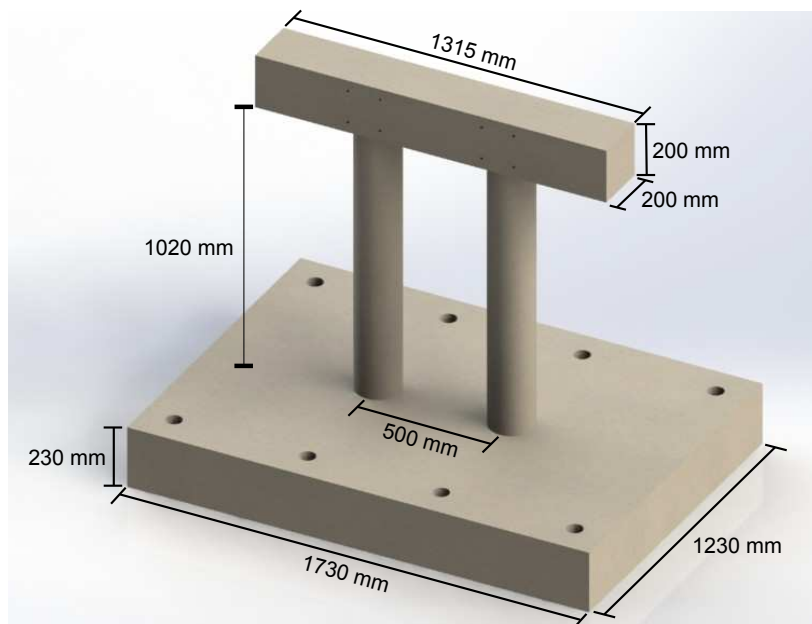


Figure 4.8 Dimensions de la pile 02

4.4.2 Construction du spécimen

La deuxième pile est coulée en deux étapes. Premièrement, la semelle est coulée avec un béton commercial ayant une résistance nominale à la compression de 30 MPa, livré par camion-malaxeur. Un joint de construction est présent entre la semelle et les poteaux. Les mêmes précautions sont prises qu'à l'essai 1.

Deuxièmement, les poteaux et le chevêtre sont coulés avec un béton spécialement conçu avec un affaissement avoisinant les 180 mm. Ce béton facilite la mise en place dans les colonnes de faibles dimensions. Il est fabriqué à l'usine de béton de l'Université de Sherbrooke. La figure 4.9 présente des photos lors de la construction et le mélange de béton est présenté à l'annexe A.2.

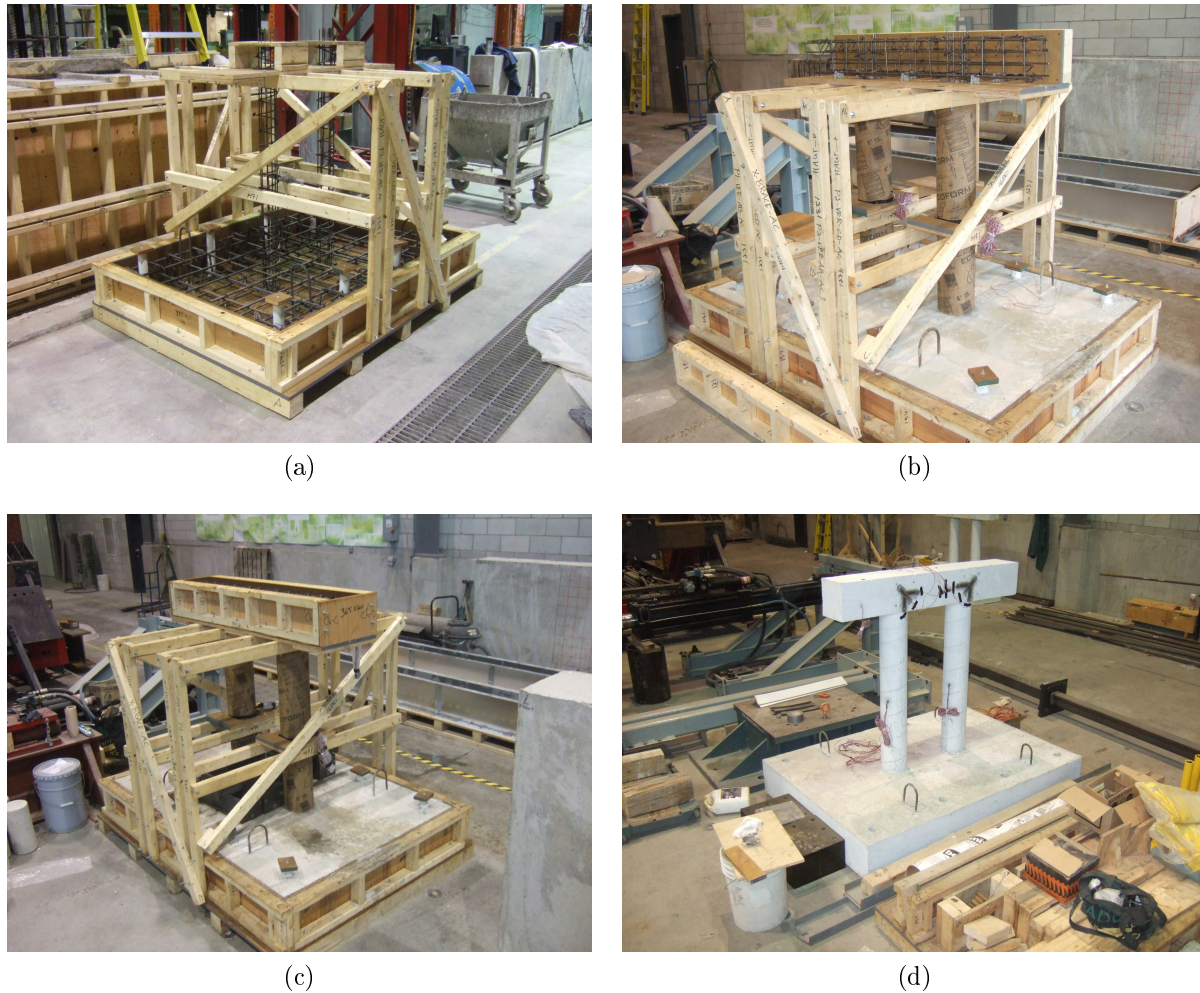


Figure 4.9 Étapes de construction de la pile 02 : (a) ferraillage de la semelle et des poteaux, (b) semelle coulée et ferraillage du chevêtre, (c) coffrage complété, (d) pile terminée

4.4.3 Matériaux

Acier

Les propriétés statiques de l'acier en tension sont déterminées selon la norme ASTM-A370 par la moyenne des résultats de trois essais de traction quasi-statiques effectués sur des barres d'armature. Pour évaluer les propriétés dynamiques de l'acier des barres d'armature 6,35 mm, les essais de traction sont effectués à trois taux de chargement différents (10^{-3} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} et 10^{-1} s^{-1}) en plus des essais quasi-statiques au taux de chargement de $4,17 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Les résultats des essais quasi-statiques et dynamiques des armatures 6,35 mm sont présentés dans les tableaux 4.4 et 4.6 respectivement. Les résultats des essais quasi-statiques des armatures 10M sont présentés au tableau 4.5. Dans les tableaux, les valeurs

f_{yqs} signifie la force à la limite plastique des essais quasi-statique en laboratoire et f_{ys} signifie la force à la limite plastique statique selon le modèle Cowper Simonds décrit plus ci-dessous. Les résultats des essais en tractions des barres 6,35 mm sont présentés à la figure 4.10.

Tableau 4.4 Propriétés statiques des barres d'armature 6,35 mm de la pile 02

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
Diamètre (mm)	6,35			-
Aire (mm ²)	31,7			-
E élastique (MPa)	207300	197700	196000	200300
E plastique (MPa)	1353	1525	970	1283
F_y (MPa)	592	510	585	562
F_u (MPa)	650	578	657	628

Tableau 4.5 Propriétés statiques des barres d'armature 10M de la pile 02

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
Diamètre (mm)	11,3			-
Aire (mm ²)	100			-
E élastique (MPa)	202400	202000	194000	199500
F_y (MPa)	470	489	496	485

Tableau 4.6 Propriétés dynamiques des barres d'armature 6,35 mm de la pile 02

Taux de chargement	f_y (MPa)	$\frac{f_y}{f_{yqs}}$ $f_{yqs} = 562 \text{ MPa}$	$\frac{f_y}{f_{ys}}$ $f_{ys} = 540 \text{ MPa}$
$4,17 \times 10^{-04}$	592	1,052	1,096
	510	0,906	0,944
	585	1,040	1,083
10^{-03}	604	1,072	1,118
	558	0,990	1,032
	555	0,986	1,028
10^{-02}	551	0,978	1,020
	568	1,009	1,052
	563	1,000	1,043
10^{-01}	587	1,043	1,087
	602	1,069	1,115
	603	1,071	1,117

Le modèle de Cowper Symonds [Cowper et Symonds, 1957] est utilisé pour caractériser l'augmentation de la résistance de l'acier en fonction du taux de chargement à l'aide de l'équation suivante :

$$\frac{f_y}{f_{ys}} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \quad (4.1)$$

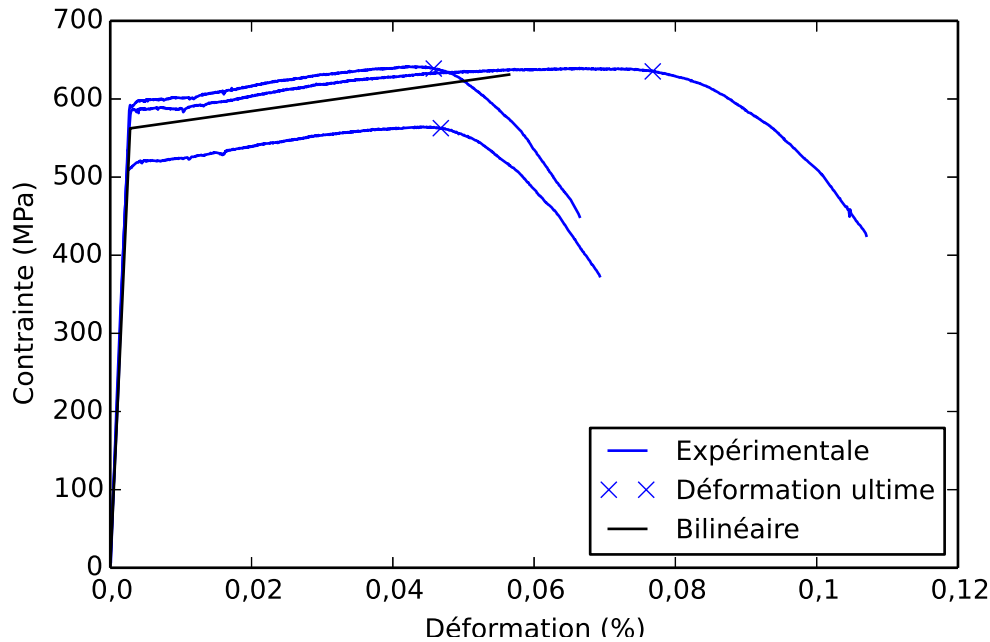


Figure 4.10 Résultats des essais de traction quasi-statique des barres d'armature 6,35 mm de la pile 02

où $\dot{\epsilon}$ est le taux de chargement, f_y et f_{ys} sont respectivement la résistance de l'acier dynamique et statique de l'acier, C et p sont des facteurs à évaluer pour bien représenter le matériau.

Les données recueillies présentent peu d'augmentation de la résistance en fonction du taux de chargement pour la plage de valeurs testée. Comme il est difficile de déterminer C et p avec les données recueillies, les valeurs proposées de $C = 3200$ et $p = 5$ pour un acier à haute résistance (314 MPa, 373 MPa, 523 MPa) sont utilisées [Paik et Thayamballi, 2003]. Selon le modèle Cowper Symonds, une augmentation de la résistance est observable au taux de chargement quasi-statique de $4,17 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Il est donc possible de déterminer $f_{ys} = 540 \text{ MPa}$ en posant :

$$\frac{f_{yqs}}{f_{ys}} = \frac{562}{f_{ys}} = 1 + \left(\frac{4,17 \times 10^{-4}}{3200} \right)^{1/5} \quad (4.2)$$

Le tableau 4.6 présente le facteur d'augmentation de la résistance comparativement à la résistance quasi-statique mesurée en laboratoire (f_y/f_{yqs}) et le facteur d'augmentation de la résistance comparativement à la résistance statique selon le modèle Cowper Symonds (f_y/f_{ys}). La figure 4.11 démontre que l'équation de Cowper Symonds avec $C = 3200$, $p = 5$

et $f_{ys} = 540$ représente bien le comportement dynamique de l'acier des barres d'armature 6,35 mm.

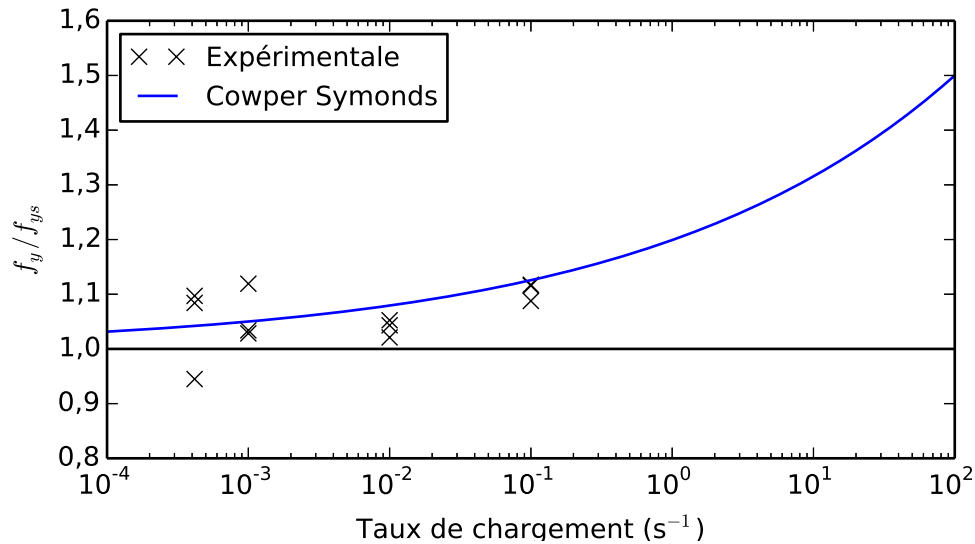


Figure 4.11 Augmentation de la résistance de l'acier en fonction du taux de chargement

Béton

Les essais sur le béton sont effectués selon la norme CSA-A23.2-09 de Association canadienne de normalisation. Les cylindres 150x300 mm sont utilisés pour les essais de compression et des poutres 100x100x400 mm pour les essais de flexion quatre points.

Le béton utilisé pour la semelle est un béton commercial typique livré par camion-malaxeur avec une résistance à la compression de 25,9 MPa à 28 jours et 27,0 MPa le jour de l'essai. Le béton des colonnes et du chevêtre est un béton avec beaucoup d'affaissement pour faciliter la mise en place. Le mélange utilisé est présenté à l'annexe A.2. Ce béton possède une résistance à la compression de 27,2 MPa à 28 jours et 34,4 MPa le jour de l'essai. Les propriétés de ces bétons sont présentées au tableau 4.7 et à la figure 4.12.

La résistance dynamique à la compression du béton est caractérisée avec le béton des colonnes et du chevêtre de la pile 03. Cette pile n'est pas abordée dans ce mémoire, mais le même mélange de béton est utilisé, les propriétés dynamiques sont présumées être les mêmes. Les tests sont faits avec des cylindres 150x300 mm à 28 jours. Trois taux de chargement différents sont utilisés pour en déterminer le facteur d'augmentation de la résistance f/f'_c en fonction du taux de chargement. Les vitesses de chargement de 0,01 mm/s (quasi-statique), 0,05 mm/s et 0,10 mm/s ont initialement été déterminés. Pour un cylindre de 300 mm, ceci correspond à des taux de chargement de $3,33 \times 10^{-5} s^{-1}$,

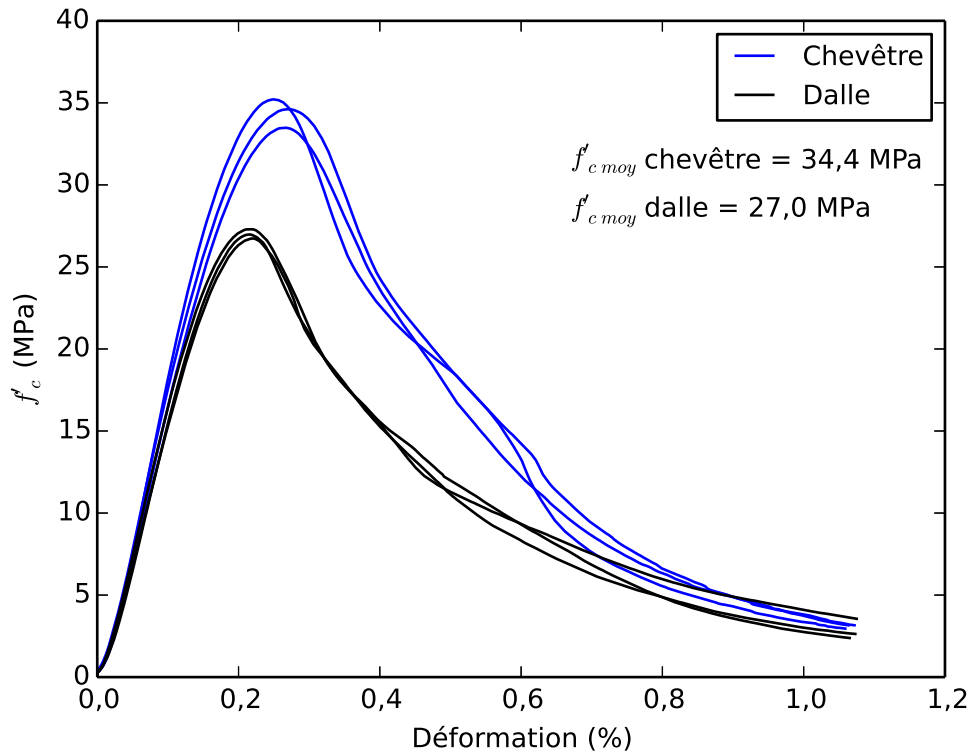


Figure 4.12 Résultats des essais de compression du béton de la pile 02 le jour de l'essai

$1,67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ et $3,33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ respectivement. Cependant, après l'analyse des résultats, les taux de chargement de $3,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, $1,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ et $3,0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ respectivement ont été observés. Le tableau 4.8 présente les résultats obtenus.

Comme la plage de taux de chargement analysée est mince et en compression seulement, l'équation ci-dessous est utilisée pour calculer la résistance dynamique du béton [Comité Euro-International du Béton, 1993; Malvar et Ross, 1998]. La figure 4.13 montre que les résultats expérimentaux concordent presque parfaitement avec l'équation en compression. Étant donné la complexité des essais, aucun test dynamique en tension n'est fait pour valider l'équation.

Tableau 4.7 Propriétés du béton de la pile 02

		Semelle		Colonnes & chevêtre	
Béton frais	Affaissement (mm)	141		155	
	Teneur en air	5,7%		4,5%	
	Densité (kg/m ³)	2300		2330	
Béton durci	Compression 7j. (MPa)	19,9	20,1	21,4	21,7
		18,7		21,9	
		21,7		21,8	
	Compression 28j. (MPa)	25,4	25,9	27,2	27,2
		26,5		26,0	
	25,9		28,5		
Compression jour de l'essai (MPa)	27,4	27,1	33,5	34,4	
	26,8		35,2		
	27,0		34,6		
Tension 28j. (MPa)	-	-	4,83*	4,49	
			4,38		
			4,59		
Tension jour de l'essai (MPa)	-	-	5,40	5,22	
			5,01		
			5,25		

*Chargement trop rapide, la valeur est négligée pour le calcul de la moyenne

Tableau 4.8 Propriétés dynamiques en compression du béton

no	Taux de chargement (s ⁻¹)	f' _c (MPa)		f/f' _c
1	3×10^{-05}	33,8	33,5	1,009
2		32,8		0,981
3		33,8		1,010
4	$1,5 \times 10^{-04}$	34,6	34,9	1,033
5		35,1		1,049
6	3×10^{-04}	35,3	36,0	1,055
7		36,7		1,097

$$\frac{f}{f_s} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^\alpha \text{ pour } -30 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 1 \text{ s}^{-1} \quad (4.3)$$

$$\frac{f}{f_s} = \gamma \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ pour } \dot{\epsilon} < -30 \text{ s}^{-1} \text{ et } \dot{\epsilon} > 1 \text{ s}^{-1} \quad (4.4)$$

avec :

$$\alpha = \frac{1,026}{5 + 9f'_c/f'_{co}} \text{ en compression et } \alpha = \frac{1}{1 + 8f'_c/f'_{co}} \text{ en tension;}$$

$$\log \gamma = 6,156\alpha - 2 \text{ en compression et } \log \gamma = 6\alpha - 2 \text{ en tension;}$$

où :

f est la résistance dynamique en tension ou en compression à $\dot{\epsilon}$;

f_s est la résistance statique en tension ou en compression à $\dot{\epsilon}_s$;

f'_c est la résistance statique en compression;

$f'_{co} = 10 \text{ MPa}$;

$\dot{\epsilon}$ est le taux de déformation dynamique (s^{-1});

$\dot{\epsilon}_s$ est le taux de déformation quasi-statique ($-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ en compression et 1 s^{-1} en tension).

4.4.4 Banc d'essai

Le même banc d'essai est utilisé pour le deuxième essai. Du matériel supplémentaire est ajouté pour appliquer la charge axiale sur les colonnes comme illustrées à la figure 4.14. La charge axiale est appliquée à l'aide de quatre vérins Enerpac et quatre tiges d'acier ancré au travers de la dalle structurale du laboratoire. Les tiges sont munies d'une rotule au niveau de la semelle pour permettre à la structure de la charge axiale de se déplacer latéralement sans poser de résistance au vérin hydraulique dans la direction horizontale.

La charge est appliquée avec un vérin hydraulique dynamique 250 kN de marque MTS. Le vérin est équipé d'une servovalve à trois étages, deux accumulateurs d'huile hydraulique sur le vérin en plus d'un accumulateur externe (HSM) d'une capacité de 113 litres à 20,7 MPa

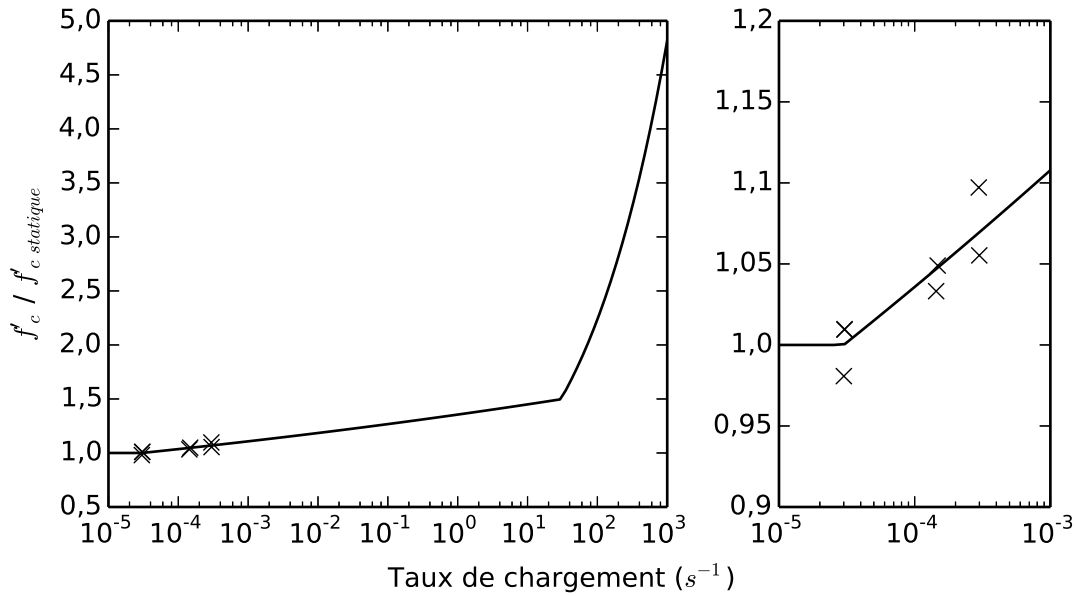


Figure 4.13 Augmentation de la résistance du béton en compression en fonction du taux de chargement

(30 gallons à 3000 psi). Ceci est requis pour reproduire des chargements à la même vitesse qu'un impact.

L'instrumentation de la pile 02 est similaire à celle de la première. L'emplacement et la numérotation des jauges est identique à la pile 01. Les deux rosettes en LVDT du chevêtre ont été remplacées par des jauges de déformation à béton étant donné que les déformations étaient trop faibles pour être mesurées avec des LVDT. Les figures 4.6 et 4.15 présentent l'instrumentation de la pile 02.

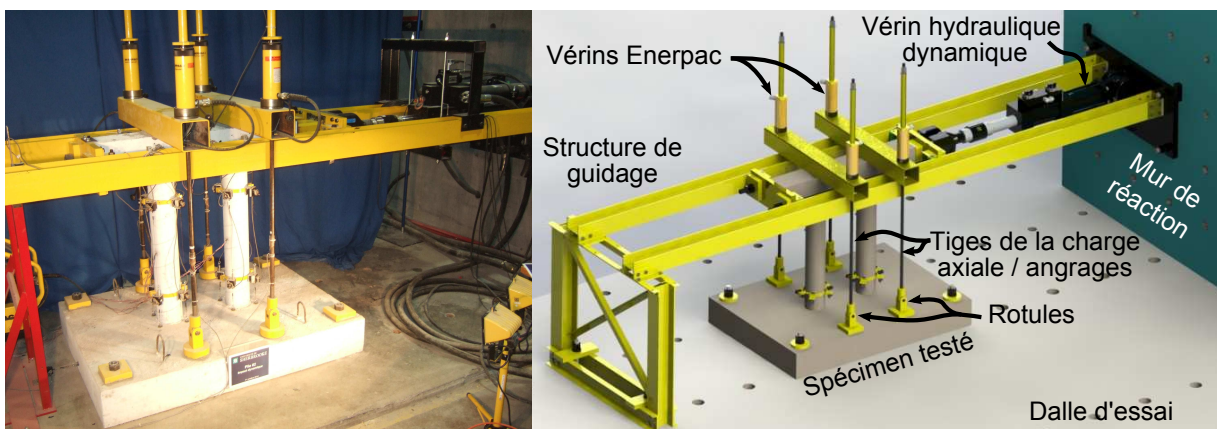


Figure 4.14 Banc d'essai de la pile 02

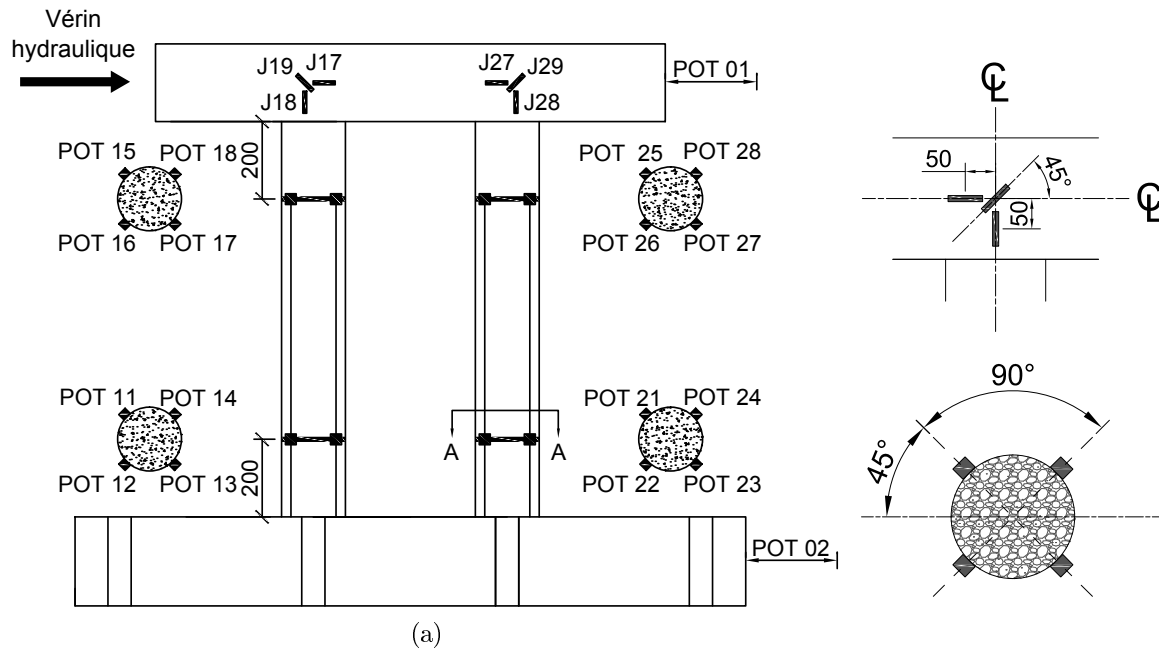


Figure 4.15 Instrumentation externe de la pile 02 : (a) vue en élévation, (b) détail des jauges, (c) coupe A-A : potentiomètres des anneaux

4.4.5 Cas de chargement

Le deuxième essai consiste à imposer au chevêtre le déplacement résultant de la réponse dynamique d'un pont soumis à une charge d'impact. Premièrement, la figure 4.16 présente l'historique de chargement de l'impact d'un camion semi-remorque de 356 kN à 80 km/h (80 000 lb à 50 mph) [Buth *et al.*, 2010] à l'échelle 1 : 6 selon les relations de similitude de Cauchy.

L'application de la charge d'impact sur la colonne du spécimen requiert l'utilisation un deuxième vérin hydraulique au niveau du chevêtre pour représenter la rigidité et la réponse dynamique de la superstructure. Comme il s'agit d'une première à l'Université de Sherbrooke pour tester un spécimen de cet envergure à une vitesse de chargement aussi élevé, il a été décidé qu'un seul vérin allait être utilisé pour le premier essai dynamique. De plus, l'application de la charge au niveau de la colonne dans le modèle numérique aurait engendré une déformée du modèle numérique différente comparée au spécimen testé en laboratoire. Pour ces raisons, la force d'impact est appliquée au niveau de la superstructure du modèle numérique LS-DYNA et un seul vérin est utilisé au niveau du chevêtre. De plus, la force d'impact est limitée à 90 % de la force réelle pour limiter le déplacement maximal de la pile à 40 mm. La réponse dynamique du modèle LS-DYNA est présentée à la figure 4.17. Plus de détails sur la modélisation sont présentés au chapitre 5.

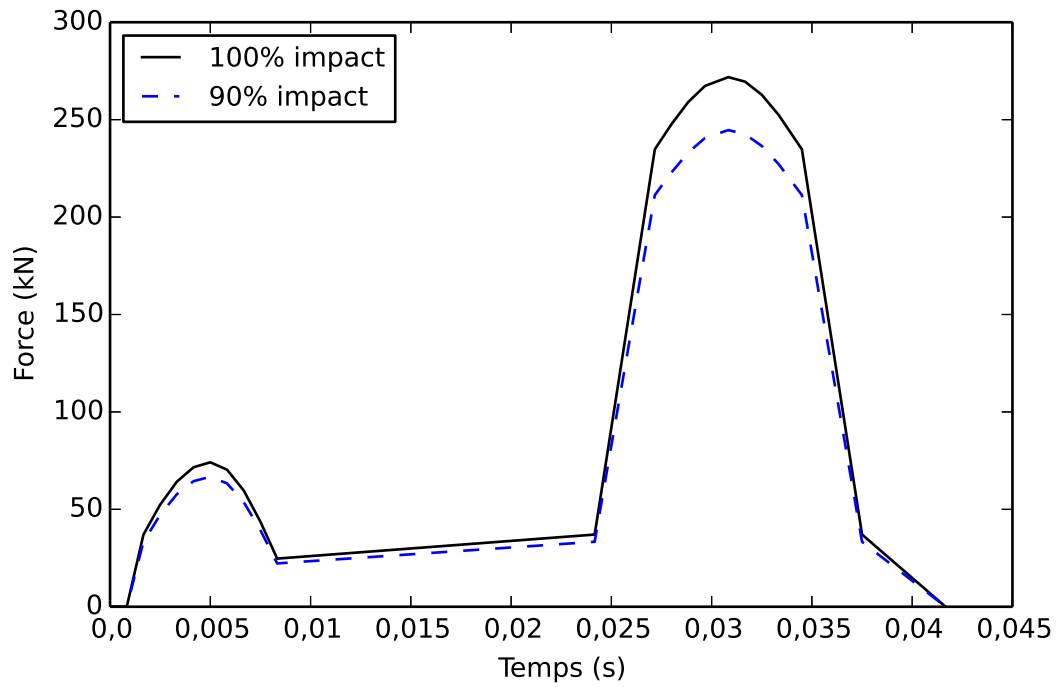


Figure 4.16 Force d'impact d'un camion 356 kN à 80 km/h à l'échelle 1 : 6

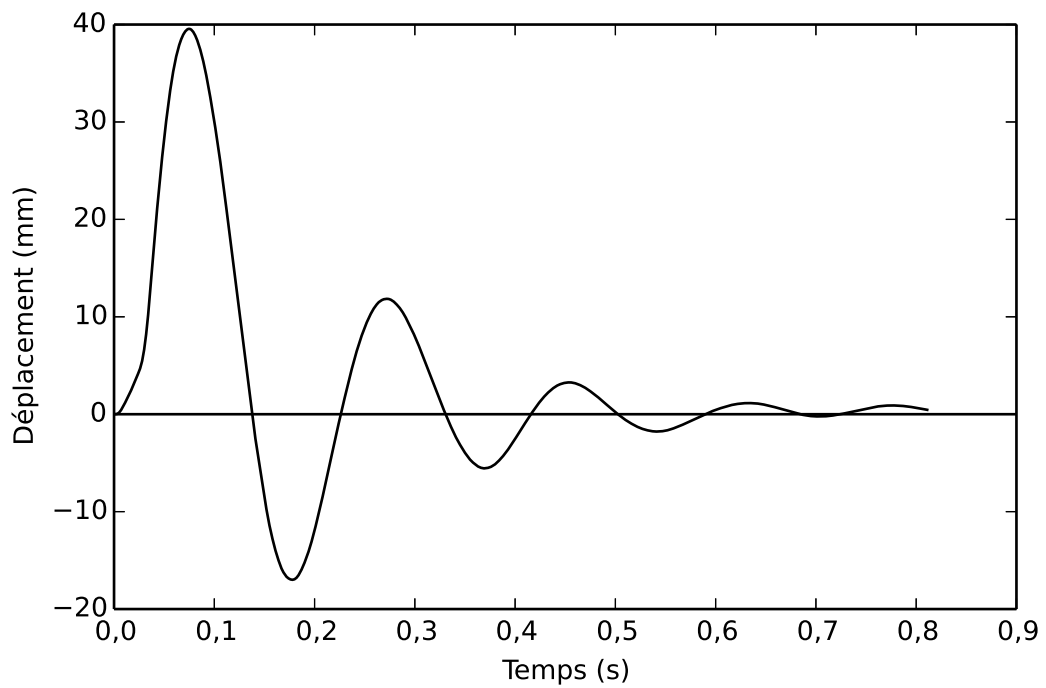


Figure 4.17 Cas de chargement pile 02 : réponse dynamique du chevêtre

CHAPITRE 5

MODÉLISATION

5.1 Modèle numérique

Pour modéliser numériquement une structure soumise à une charge d'impact de camion, il faut un algorithme capable de bien représenter des comportements fortement non linéaires à des taux de déformation élevés ainsi qu'un algorithme stable. Pour ces raisons, la méthode d'intégration explicite utilisée par le logiciel LS-DYNA est choisie. Ce logiciel est largement utilisé dans le domaine de l'automobile pour la modélisation de collisions d'une voiture ainsi que pour le formage du métal [LSTC inc., 2017]. Aussi, il a fait ses preuves pour la modélisation de structures en béton armé soumises à des impacts d'un projectile, à des explosions et à des collisions de barges [Consolazio *et al.*, 2006; Crawford *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2012].

La méthode d'intégration temporelle explicite de LS-DYNA résout l'équation du déplacement dynamique à chaque pas de temps Δt . Pour s'assurer que les calculs convergent, le pas de temps choisi doit être plus petit que le pas de temps critique. Ce dernier correspond approximativement au temps qu'une onde sonore met pour traverser un élément par la plus petite longueur caractéristique [LSTC, 2013a]. Elle dépend donc des propriétés du matériau et de la grosseur de chaque élément. Les formules utilisées pour calculer le pas de temps critique sont présentées dans le LS-DYNA Theory Manual [LSTC, 2006]. Le pas de temps est automatiquement calculé par LS-DYNA après chaque incrément selon $\Delta t = 0,9\Delta t_{critique\ min}$. Pour des raisons de stabilité, un facteur de 0,9 est appliqué par défaut.

Le programme de modélisation comprend trois modèles numériques. Le modèle numérique 1 correspond à la pile 01 testée en laboratoire. Il est calibré à l'aide des résultats quasi-statiques du premier essai.

Le modèle numérique 2.1 est bâti selon la calibration statique du modèle 1, adapté selon les dimensions et les propriétés des matériaux de la pile 02 et inclut une superstructure idéalisée pour bien représenter l'amortissement, la rigidité et la masse d'un pont. Il sert à définir la réponse dynamique de la pile soumise à une charge d'impact dans le but de déterminer la courbe de chargement du deuxième essai en laboratoire.

Finalement, le modèle numérique 2.2 est calibré avec les résultats de l'essai dynamique de la pile 02. La superstructure n'est pas intégrée dans les modèles 1 et 2.2 puisqu'ils recréent les conditions en laboratoire. Les trois modèles numériques sont présentés à la figure 5.1. Le modèle 2.1 est légèrement différent des modèles 1 et 2.2 parce qu'il est basé sur une version antérieure du modèle 1. Le modèle 2.1 n'est donc pas présenté en détail dans ce chapitre. Une version simplifiée du code de chaque modèle est présentée à l'annexe B.

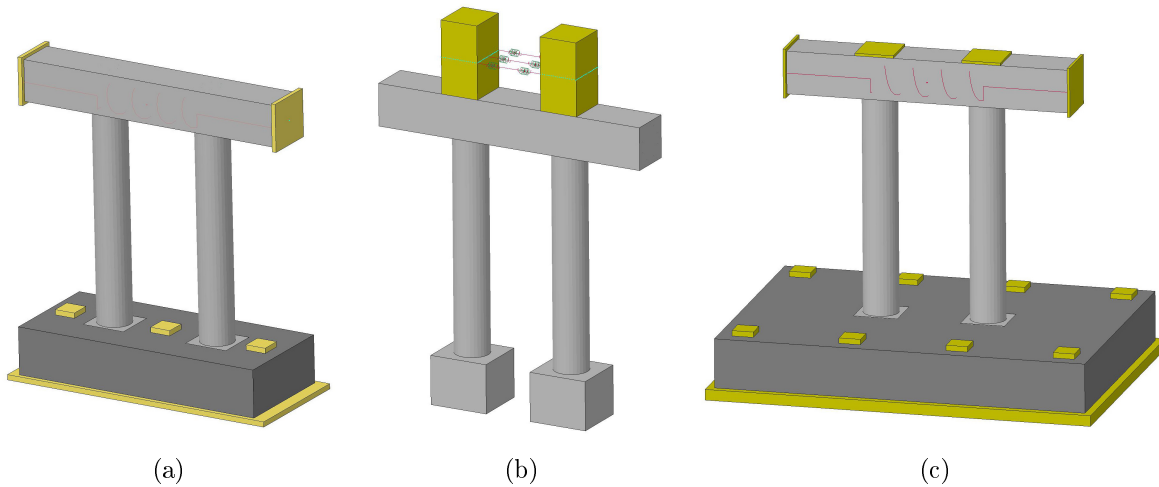


Figure 5.1 Modèles numériques LS-DYNA : (a) modèle 1 : pile 01 calibrée, (b) modèle 2.1 : pile 02 avec la superstructure, (c) modèle 2.2 : pile 02 calibrée

LS-DYNA n'a pas de système d'unité prédéfinie. Pour cette raison, il faut utiliser un système d'unités consistant. Les unités utilisées dans les modèles sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.1 Unités du modèle LS-DYNA

Temps	seconde	Longueur	mm
Masse	tonne	Vitesse	mm/s
Force	N	Accélération	mm/s ²
Pression	MPa	Masse volumique	tonne/mm ³

Les modèles numériques sont calculés sur le superordinateur Mammouth parallèle 2 de l'Université de Sherbrooke. Le Mammouth possède 3264 processeurs AMD de 12 coeurs de 2,1 GHz. La version de LS-DYNA utilisé est MPP d R7.0.0. Les analyses dynamiques sont effectuées avec 12 à 24 coeurs de calcul et les analyses quasi-statique avec 48 à 72 coeurs de calcul.

5.2 Béton

Plusieurs modèles de béton sont disponibles dans le logiciel LS-DYNA. Les plus utilisés sont :

- *MAT_Concrete_Damage_Rel3 (MAT072R3),
- *Mat_CSM_Comcrete (MAT159),
- *Mat_Winfrith_Concrete (MAT084)

parce qu'ils sont autogénérés à l'aide de caractéristiques du béton généralement connues tels la résistance à la compression, la densité, le module d'élasticité, etc. Plusieurs études comparant les résultats obtenus avec différents matériaux concluent que le matériau 72R3 permet d'obtenir de meilleurs résultats [Dorsselaer *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2012]. Pour ces raisons, ce matériau est utilisé pour modéliser le béton.

Le matériau 72R3 est développé par la compagnie Karagozian & Case. Il est basé sur un modèle par endommagement avec trois plans de rupture : la résistance de plastification, la résistance maximale et la résistance résiduelle. Ces trois courbes sont définies en fonction du confinement. Un facteur d'endommagement variant de 0 à 2 permet d'interpoler les valeurs entre ces trois courbes. Entre 0 et 1, le modèle interpole entre la courbe de résistance de plastification et la courbe de résistance maximale. Entre 1 et 2, le modèle interpole entre la courbe de résistance maximale et la résistance résiduelle. Donc un endommagement de 0 correspond à la phase élastique, entre 0 et 1 correspond à la phase plastique avant la résistance ultime, entre 1 et 2 correspond à l'adoucissement jusqu'à la résistance résiduelle. La figure 5.2 illustre l'interpolation entre les trois plans. Entre autres, la formulation de ce modèle permet de représenter l'adoucissement du matériau après la rupture ainsi que le confinement du béton.

Les auteurs du modèle de matériau ont identifié certaines problématiques énumérées ci-dessous [Crawford *et al.*, 2012] :

- le modèle comporte seulement un facteur d'endommagement pour la compression et la tension, l'endommagement excessif en tension a donc un effet sur les propriétés en compression du béton et vice-versa ;
- le modèle est basé sur une formulation isotropique et est incapable de suivre l'évolution de la fissuration et de ses effets sur la performance du béton ;
- certains paramètres du modèle dépendent de la grosseur des éléments ce qui peut avoir un effet sur l'adoucissement du modèle de béton.

Les deux premiers points peuvent avoir une conséquence principalement sur les résultats du premier modèle. Le type de chargement quasi-statique comporte de multiples cycles avec des ouvertures et fermetures de fissures répétitives. Le modèle d'endommagement ne fait pas de différence entre l'endommagement en compression et en tension [Crawford *et al.*, 2012]. Par exemple, lorsqu'un élément de béton atteint sa résistance ultime en tension, son endommagement atteint la valeur de 2. Lors du chargement inverse, l'élément pleinement endommagé entre en compression et prend la résistance résiduelle du béton en compression alors qu'il peut encore être dans la phase élastique. Il y a donc un endommagement irréaliste et cumulatif. Ce phénomène est moins critique dans le deuxième essai étant donné que la majorité de l'endommagement survient lors du premier cycle.

5.2.1 Calibration et validation du modèle de béton

Le modèle de béton est complexe et requière plus de 50 paramètres ainsi qu'une équation d'état du matériau (EOS). Le modèle est donc muni d'un générateur de paramètre calibré

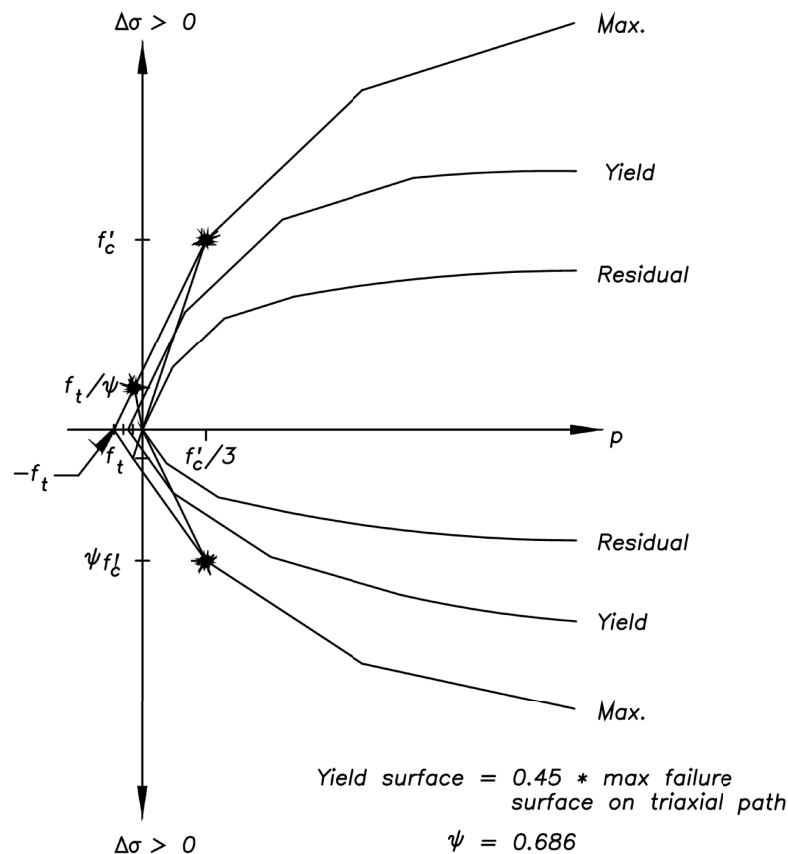


Figure 5.2 Modèle 72R3 : interpolation de l'endommagement entre les plans de rupture [Crawford *et al.*, 2012]

avec un béton de 42 MPa pour le rendre plus accessible. Pour une calibration complète du matériau, des essais triaxiaux sont requis. Étant donné la complexité de ces essais, le modèle généré par LS-DYNA est utilisé et validé en le comparant avec le modèle Cusson-Paultre [Cusson et Paultre, 1995] à l'aide du logiciel WMNPhi [Paultre, 2000].

Le modèle 72R3 est développé et calibré avec un seul élément cubique [Crawford *et al.*, 2012]. Or, il a été observé lors des modélisations que les éléments au centre d'une structure sont confinés par les éléments en périphéries. Ceci crée du confinement dans le béton sans même avoir d'étriers. Pour cette raison, le modèle est calibré à l'aide des résultats d'un cylindre de dimension identique à ceux testés en laboratoire avec un maillage similaire aux modèles en question. Le modèle est donc généré avec une résistance inférieure aux résultats obtenus en laboratoire pour obtenir une résistance identique aux essais de compression des cylindres.

Pour valider le comportement du matériau, les deux principaux paramètres analysés sont l'effet du confinement et de la charge axiale sur le comportement d'une section de la colonne. En premier lieu, des tests de compression sont effectués avec trois confinements différents. Le premier essai est non confiné (sans armature) et représente les essais de compression effectués en laboratoire avec un cylindre de 150 mm de diamètre par 300 mm. Le deuxième correspond à un béton confiné avec des étriers en spirale de 6,35 mm de diamètre avec un pas de 75 mm c/c. Le troisième représente une section des colonnes de la pile soit un noyau de béton confiné et le recouvrement de l'armature non confiné. Les résultats obtenus avec le matériau 72R3 de LS-DYNA et le modèle Cusson-Paultre sont présentés à la figure 5.3. Il est possible d'observer que le modèle 72R3 est plus rigide et instable passé un certain niveau de ductilité comparé au modèle Cusson-Paultre, mais la force maximale des deux modèles est similaire.

L'impact de la charge axiale sur le modèle est évalué à l'aide de la courbe d'interaction moment-courbure ($M-\Phi$). La figure 5.4 présente le modèle LS-DYNA utilisé. Il représente un poteau de la pile 02 encastré aux deux extrémités. Trois taux de charge axiale sont utilisés pour comparer les deux modèles soit 0 %, 5 % et 10 % de la résistance en compression du poteau ($A_g f'_c$). Les résultats sont présentés à la figure 5.5. Le modèle LS-DYNA et Cusson-Paultre obtiennent des résultats comparables et similaires aux cylindres en compression. Il est à noter que le modèle 72R3 est calibré pour des essais dynamiques à haut taux de déformation tandis que le modèle Cusson-Paultre est statique.

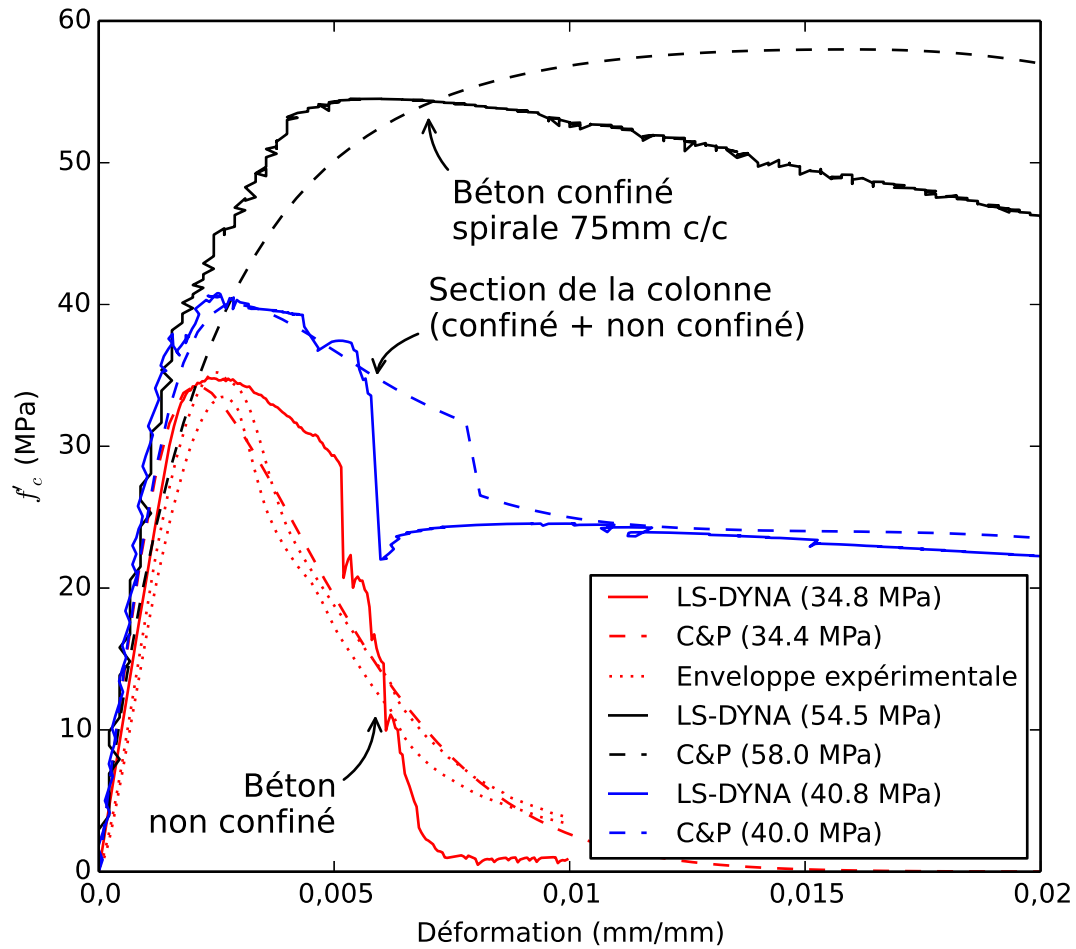


Figure 5.3 Comparaison du confinement du matériau 72R3 de LS-DYNA avec le modèle Cusson-Paultre

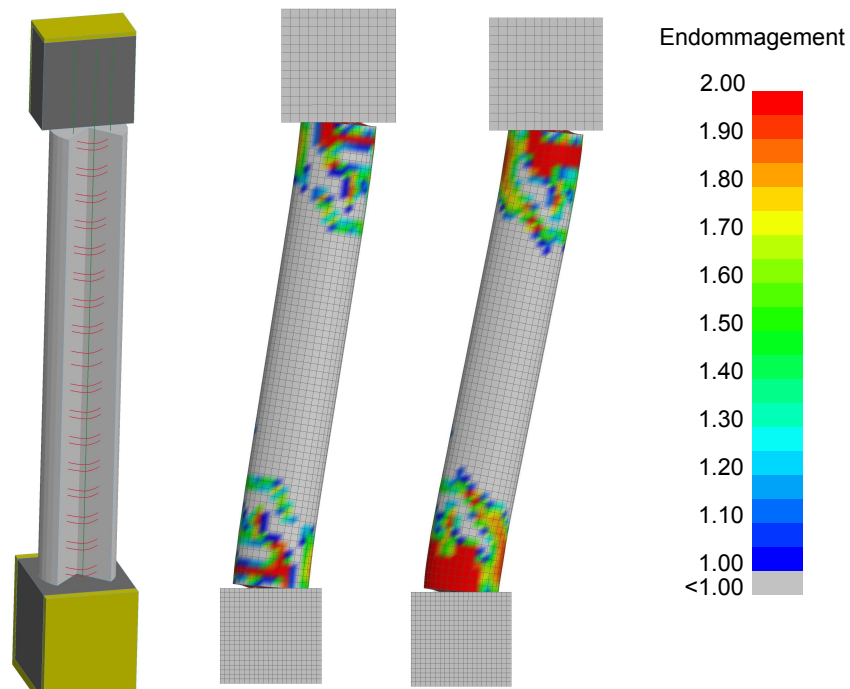


Figure 5.4 Modèle numérique de la validation de la courbe M- Φ en fonction de la charge axiale

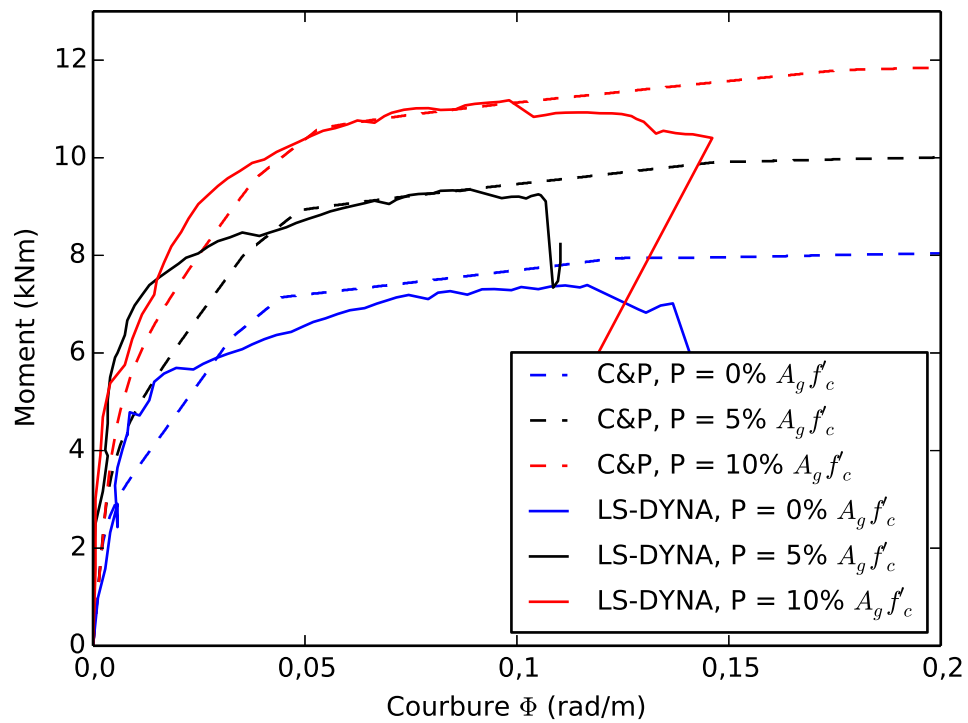


Figure 5.5 Comparaison de la courbe M- Φ numérique avec le modèle Cusson-Paultre

5.2.2 Maillage

La pile est modélisée à l'aide de 4 pièces (*PART) en béton utilisant le modèle de matériau 72R3 : la semelle, le poteau 1, le poteau 2 et le chevêtre. La figure 5.6 présente les pièces en béton et leur maillage. Chaque pièce comporte un maillage indépendant relié entre eux avec un élément contact décrit à la section 5.2.3. Les éléments utilisés sont des éléments solides à un point d'intégration.

La semelle est constituée de 2640 éléments de l'ordre de grandeur de 20 x 20 x 20 mm. Des éléments cubiques de dimensions variables sont utilisés pour faire coïncider le maillage du béton avec les barres d'armatures.

Chaque poteau comporte 68 tranches de 15 mm de haut. Chaque tranche comporte un maillage circulaire de 224 éléments. Les éléments cubiques au centre ont une dimension de 7,2 x 7,2 mm et les éléments trapézoïdaux en périphérie de 16 x 12 mm.

Le chevêtre est constitué de 44080 éléments cubiques de l'ordre de grandeur de 10 x 10 x 10 mm. Des éléments cubiques de dimensions variables sont utilisés pour faire coïncider le maillage du béton avec les barres d'armatures.

En plus de ces 4 pièces, les modèles numériques 1 et 2.2 possèdent une semelle en béton utilisant un matériau élastique. Comme cette pièce ne subit pas d'endommagement et peu de déformation, un maillage deux fois plus gros et un matériau parfaitement élastique (*MAT_ELASTIC) sont utilisés. Une transition dans le maillage est utilisée pour permettre de lier la pièce élastique à la pièce plastique.

5.2.3 Éléments contacts

Les poteaux sont liés à la semelle et au chevêtre à l'aide d'éléments contacts. Ces éléments permettent de lier deux maillages différents entre eux. LS-DYNA possède plusieurs éléments contacts permettant de représenter divers phénomènes mécaniques. Le type d'élément utilisé pour lier les poteaux au chevêtre et à la semelle est *CONTACT_AUTO-MATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK. Les éléments contacts de type « tie-break » permettent de libérer les noeuds une fois le critère de rupture prédéfinie atteint.

Les modèles 1 et 2.1 utilisent la formulation avec `OPTION = 2`. Ceci permet de lier les noeuds esclaves initialement en contact aux noeuds maîtres jusqu'à la rupture. Le modèle 2.2 utilise la formulation avec `OPTION = 6`. Cette formulation est semblable à l'option 2 avec l'ajout d'un endommagement après la rupture. Le facteur d'endommagement est interpolé linéairement en fonction de l'ouverture de fissure. L'ouverture de fissure

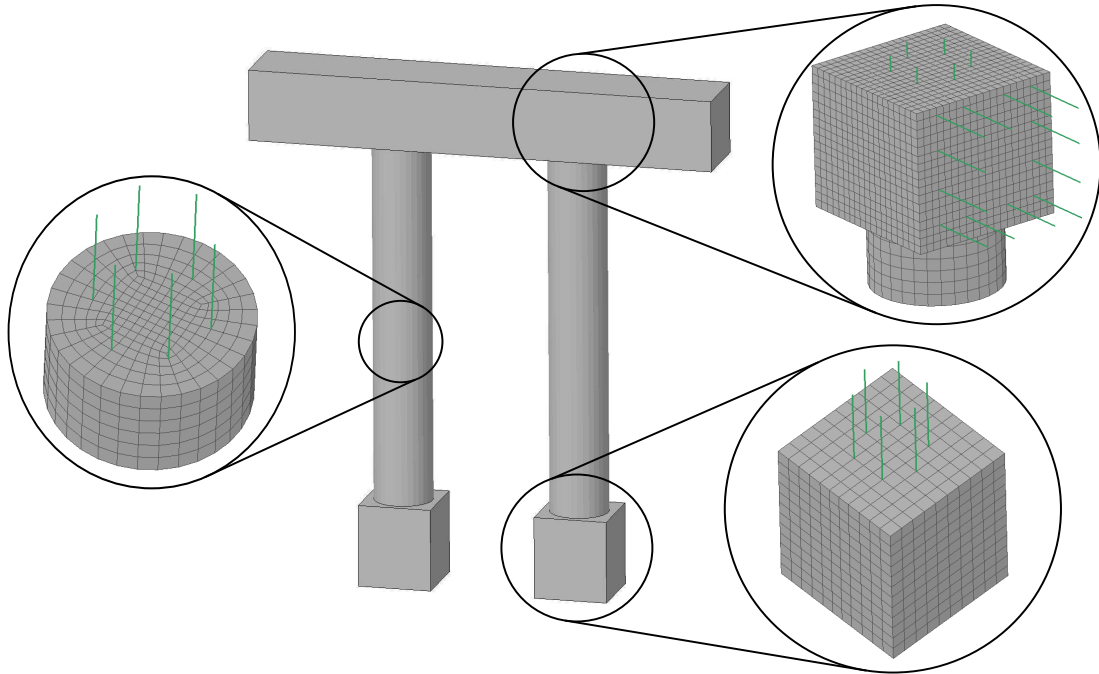


Figure 5.6 Maillage des éléments en béton (Pile 02)

maximum est définie par le facteur $PARAM = 5$ mm. Cette formulation est adoptée dans le modèle 2.2, car l'option 2 permettait un léger soulèvement du poteau lors du changement de direction du chevêtre occasionnant un déplacement relatif du poteau par rapport à la semelle. L'ajout d'un facteur d'endommagement au niveau de l'élément contact permet de corriger ce problème. Dans les deux cas, le critère de rupture du modèle est défini par l'équation suivante :

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS} \right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS} \right)^2 \geq 1 \quad (5.1)$$

où σ_n et σ_s sont respectivement la contrainte normale et de cisaillement sur l'interface de contact, NFLS et SFLS sont les contraintes de rupture normale et en cisaillement prédéfinies [LSTC, 2013b]. À défaut d'avoir la résistance en tension expérimentale du béton pour les modèles 1 et 2.1, elle est évaluée à $0,6\sqrt{f'_c}$ comme prescrit par l'article 8.6.4 des normes CSA-A23.3-04 et CSA-A23.3-14. Pour favoriser la rupture en tension (fissuration) dans l'élément contact et non dans les éléments béton, la valeur de NFLS est fixée à 80 % de la résistance en traction pour les modèles 1 et 2.2. Étant donné que l'ouverture et la fermeture de la fissure se produisent dans l'élément contact, ceci permet de l'imiter l'endommagement irréaliste du modèle de béton.

Après la rupture de l'élément contact, il se comporte selon un modèle de friction définie par l'équation suivante :

$$\mu_c = FD + (FS - FD) e^{-DC|v_{rel}|} \quad (5.2)$$

où FS est le coefficient de friction statique, FD est le coefficient de friction dynamique, DC est le facteur d'interpolation exponentiel et v_{rel} est la vitesse relative entre les deux surfaces [LSTC, 2013b]. Le modèle de béton représente plus fidèlement le comportement en cisaillement du béton et des armatures de confinement. Pour cette raison, la rupture potentielle en cisaillement dans les éléments en béton est privilégiée à la rupture des éléments contacts. Une formulation statique est donc adoptée. En posant FD et DC = 0, la formule de μ_c devient $\mu_c = FS$. Pour le modèle 2.2, un FS élevé est utilisé pour éviter tout glissement. Les paramètres des éléments contacts utilisés pour les différents modèles numériques sont présentés au tableau 5.2.

Tableau 5.2 Propriétés des éléments contacts type tiebreak pour une interface béton-béton

		Modèle 1	Modèle 2.1	Modèle 2.2
FS	Coefficient de friction statique	0,80	0,80	9999
OPTION	Formulation de l'élément contact	2	2	6
NFLS	Contrainte normale max (MPa)	2,90	3,60	4,18
SFLS	Contrainte cisaillement max (MPa)	1,27	1,27	0,82
PARAM	Ouverture de fissure max (mm)	0	0	5

5.3 Armatures

La figure 5.7 présente les éléments barres du modèle numérique. Les barres d'armatures sont modélisées à l'aide d'éléments barres Hughes-Liu. Le matériau utilisé est le *MAT_PLASTIC_KINEMATIC. Ce matériau à un comportement bilinéaire qui tient compte du taux de chargement. Le tableau 5.3 présente les paramètres du matériau pour les trois modèles.

Tableau 5.3 Paramètres du matériau acier

		Modèle 1	Modèle 2.1	Modèle 2.2
RO	Densité (tonne/m ³)	7,8e-9	7,8e-9	7,8e-9
E	Module d'élasticité (MPa)	201000	201000	200300
PR	Coefficient de Poisson	0,3	0,3	0,3
SIGY	Contrainte de plastification (MPa)	498	540	562
ETAN	Module plastique (MPa)	1013	852	1283
BETA	Paramètre de raidissement β	1,0	1,0	1,0
SRC	Paramètre de raidissement C*	0	3200	3200
SRP	Paramètre de raidissement P*	0	5,0	5,0

* Variable du modèle de Cowper Symonds, voir section 4.4.3

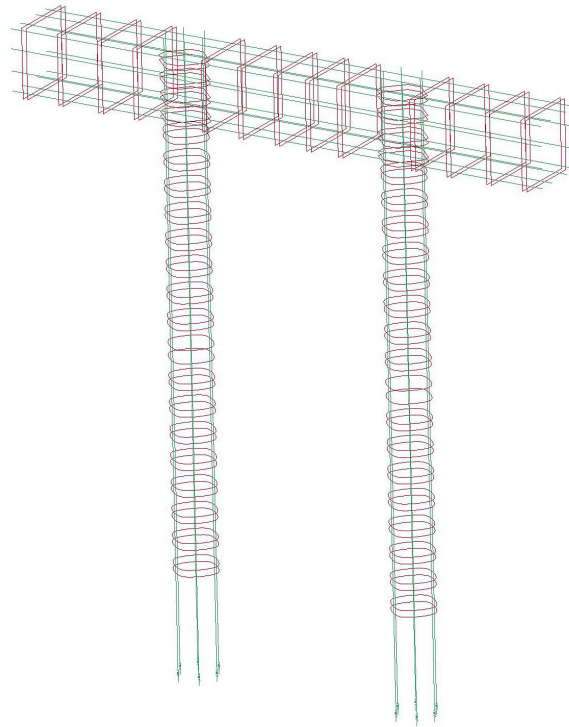


Figure 5.7 Armature du modèle numérique (Pile 01)

5.3.1 Maillage

Le maillage des barres d'armature longitudinale des poteaux concorde avec le maillage des éléments béton, mais avec un dédoublement des noeuds pour permettre le glissement, voir la section 5.3.3 ci-dessous pour plus de détails.

La modélisation des armatures en spirale ne permet pas de reproduire l'effet de confinement dans le modèle. Les armatures de confinement circulaire espacées à 60 mm c/c s'est avérées reproduire un comportement similaire à des armatures en spirale avec un pas de 75 mm tel que prédit par le modèle Cusson-Paultre (voir section 5.2). Pour bien reproduire le comportement de confinement, il a été observé qu'une tranche d'élément solide doit être confinée à l'aide de deux éléments barres d'aire équivalente à une barre de 6,35 mm. L'utilisation d'une seule barre confine partiellement le noeud d'intégration de l'élément solide tel qu'illustré à la figure 5.8 .

5.3.2 Ancrage des armatures

Les résultats de l'essai 1 présentent des signes de perte d'ancrage des barres d'armature dans la semelle. Pour simuler ce comportement, les modèles numériques 1 et 2.1 possèdent

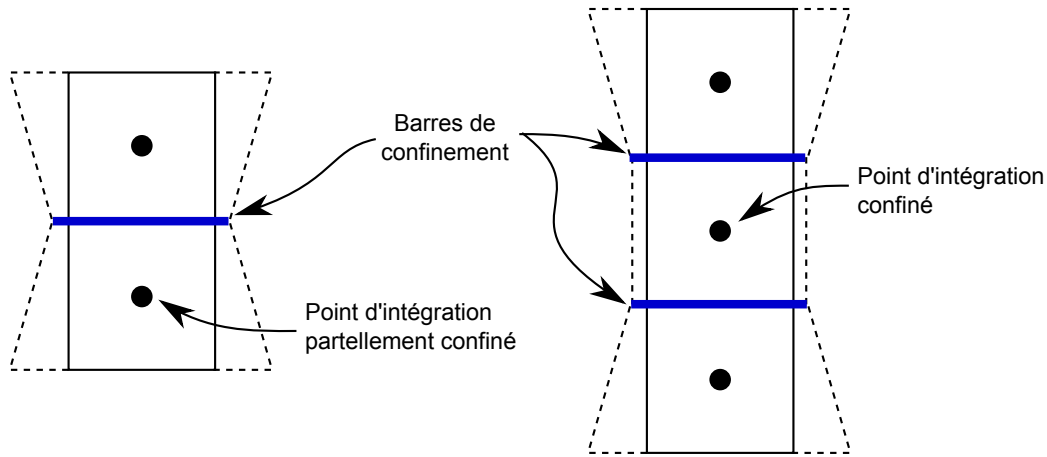


Figure 5.8 Confinement des éléments solides

des éléments ressort dans la semelle pour représenter l'ancrage des barres d'armature. Lors de l'essai 2, aucun signe de perte d'ancrage des barres d'armature n'est présent. Pour cette raison, le dernier noeud de la barre d'armature est un noeud commun avec les éléments solides du béton pour représenter un ancrage parfait. De plus, aucune information n'a été trouvée dans la littérature sur le comportement d'un ancrage d'une barre d'armature lisse à des taux de déformation élevés.

Les ressorts sont des éléments discrets. Le modèle 1 utilise le matériau non linéaire `*MAT_SPRING_INELASTIC` en tension seulement. Le modèle 2.1, basé sur une version antérieure du modèle 1, utilise aussi un matériau non linéaire, mais selon la formulation `*MAT_SPRING_NONLINEAR_ELASTIC`. La résistance maximale des ressorts utilisés dans le modèle 2.1 est grandement supérieure aux modèles 1. Ceci a peu d'effet sur les résultats étant donné que l'essai dynamique ne présente pas de signe de rupture de l'ancrage des barres d'armature.

La résistance des ancrages est définie selon les résultats trouvés dans la littérature et calibrée avec les résultats expérimentaux. Selon Soroushian *et al.*, le comportement des ancrages de barre lisse se caractérise par l'équation suivante :

$$P = \begin{cases} P_1 (U/U_1)^\alpha & \text{pour } U \leq U_1 \\ P_1 & \text{pour } U_1 < U \leq U_2 \\ P_1 + (P_3 - P_1)(U - U_2) / (U_3 - U_2) \geq P_3 & \text{pour } U \geq U_2 \end{cases} \quad (5.3)$$

où P est la force, les déplacements $U_1 = 2,54$ mm, $U_2 = 7,62$ mm, $U_3 = 38,1$ mm et le coefficient $\alpha = 0,2$ proviennent de la littérature [Soroushian *et al.*, 1988]. La résistance maximale $P_1 = 7790$ N et la résistance résiduelle $P_3 = 4520$ N proviennent de la calibration.

La courbe de résistance en traction du ressort est présentée à la figure 5.9. Le matériau *MAT_SPRING_INELASTIC suit la courbe force-déplacement prédéfinie. Lors du déchargement, un module $KU = 7103$ MPa est utilisé.

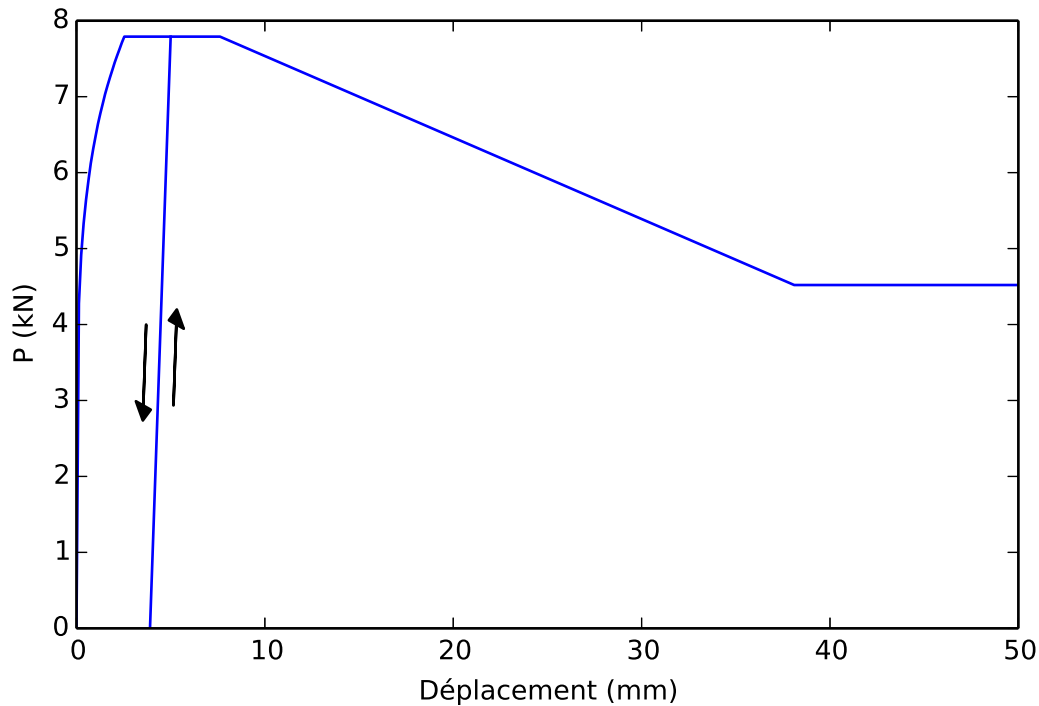


Figure 5.9 Courbe force-déplacement des ancrages

5.3.3 Éléments contacts armature/béton

Trois principales méthodes de liaisons sont utilisées dans LS-DYNA pour lier les éléments barres de l'armature aux éléments solides du béton. La première et la plus simple au niveau numérique consiste à utiliser des noeuds communs entre les éléments barres et les éléments béton. La deuxième consiste à utiliser une interpolation de Lagrange pour lier l'armature au béton à l'aide de la commande *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID. Cette méthode permet de positionner et mailler les éléments barres indépendamment du maillage des éléments solides. La troisième méthode consiste à utiliser un élément contact (*CONTACT_1D) permettant de représenter le glissement de l'armature.

L'armature utilisée dans la partie expérimentale est lisse. Suite à l'analyse des résultats, le glissement des barres d'armature s'est avéré non négligeable. Pour cette raison, les éléments *CONTACT_1D sont utilisés pour simuler le glissement des barres d'armature.

L'interaction force glissement de l'élément contact est défini par l'équation suivante :

$$f_{n+1} = \min(f_n - GB A_s \Delta u ; GB A_s u_{max}) \quad (5.4)$$

où GB est le module de cisaillement de la liaison, A_s est l'aire de contact, Δu la variation de glissement entre n et n+1, u_{max} est le glissement maximal admissible défini par l'équation :

$$u_{max} = SMAX e^{-EXP D} \quad (5.5)$$

où SMAX est le glissement maximal, EXP le facteur d'endommagement et D le paramètre d'endommagement défini par $D_{n+1} = D_n + \Delta u$.

Les essais d'arrachement sur des barres lisses trouvés dans la littérature sont caractérisés par une phase élastique due à l'adhérence suivie d'une phase plastique due à la friction lors du glissement. Un exemple est illustré à la figure 5.10a. Pour bien représenter ce comportement avec l'élément *CONTACT_1D, il faut utiliser deux éléments contacts superposés tels qu'illustrés à la figure 5.11a. Le premier élément contact représente la friction et comporte un facteur d'endommagement EXP très faible. Le deuxième représente la différence entre l'adhérence et la friction et possède un facteur d'endommagement représentatif.

Pour un chargement cyclique sur une barre lisse, le comportement est sensiblement le même et est fonction du glissement relatif maximal (figure 5.10(b) [Verderame *et al.*, 2009]). Cependant, l'élément contact utilisé dans LS-DYNA comporte un modèle d'endommagement qui est fonction du glissement relatif total. Le comportement de l'élément CONTACT_1D permet néanmoins d'obtenir un comportement similaire pour les premiers cycles (figure 5.11(b)). Le tableau 5.4 présente les paramètres des éléments contacts. Les valeurs de ce tableau sont inspirées de la littérature [Mo et Chan, 1996; Verderame *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2014]. Elles ont été ajustées selon les propriétés des matériaux et selon la calibration du modèle. Les modèles 1 et 2.1 ont une formulation différente du modèle 2.2. Pour ce dernier, les valeurs de SMAX sont multipliées par un facteur de 100 et les valeurs de GB par un facteur de 0,01. La force maximale de l'élément contact avant le glissement reste dans le même ordre de grandeur, la seule différence est la diminution de la rigidité des éléments contacts pour le modèle 2.2.

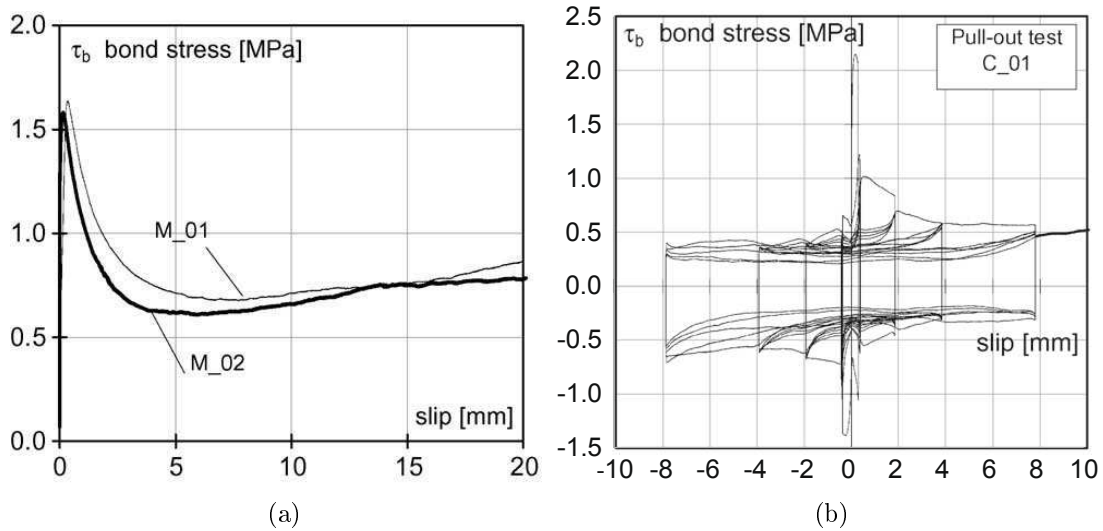


Figure 5.10 Comportement du glissement des barres d'armature lisses selon la littérature : (a) arrachement, (b) arrachement cyclique [Verderame *et al.*, 2009]

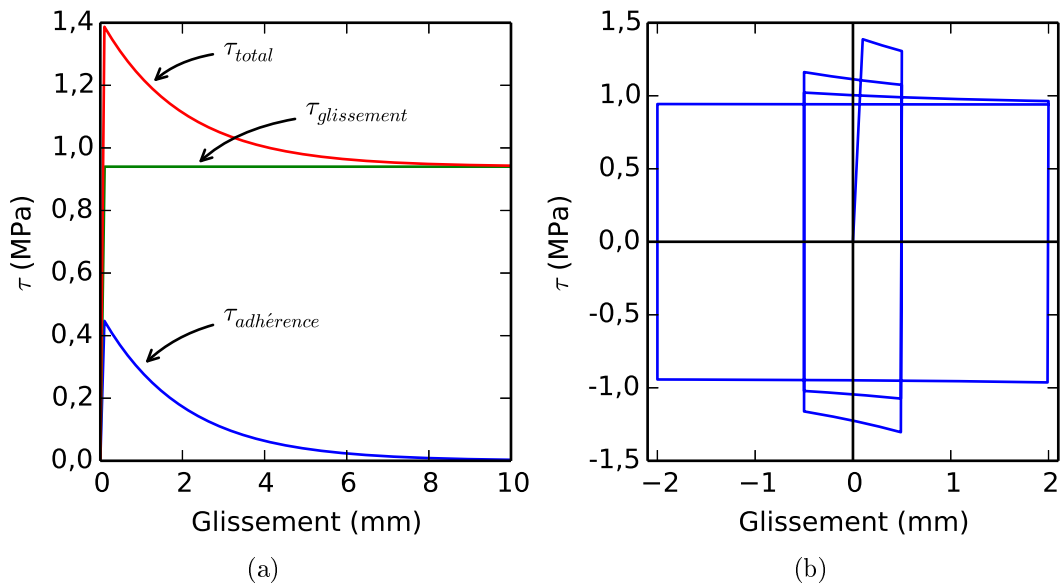


Figure 5.11 Comportement du glissement des barres d'armature lisses du modèle LS-DYNA : (a) arrachement modèle 2.2, (b) arrachement cyclique modèle 2.2

5.4 Chargement

5.4.1 Initialisation du modèle

Les charges gravitaires sont appliquées avec la commande *LOAD_BODY_GENERALIZED_SET_PART. Pour les modèles 1 et 2.2, l'accélération AZ est égale à 9810 mm/s²

Tableau 5.4 Propriétés des éléments contacts pour une interface armature-béton

		Modèle 1		Modèle 2.1		Modèle 2.2	
ERR	Rayon de la barre (mm)	3,17	-	3,17	3,17	3,17	3,17
SIGC	Résistance du béton (MPa)	36,6	-	36,6	36,6	34,4	34,4
GB	Module de cisaillement (MPa)	1000	-	1180	640	9,4	4,7
SMAX	Glissement maximum (mm)	0,002	-	0,002	0,002	0,1	0,1
EXP	Facteur d'endommagement	1E-6	-	0,5	1E-4	0,5	1E-6

pour représenter les conditions en laboratoire. Le modèle 2.1 est soumis à une accélération $AZ = 6g = 58860 \text{ mm/s}^2$ pour respecter le facteur d'échelle de Cauchy. Voir section 4.1 pour plus de détail.

La charge axiale sur les poteaux est appliquée à l'aide de plaques rigides et la commande `*LOAD_RIGID_BODY`. Cette méthode permet d'appliquer une charge dans l'axe indiqué indépendamment de l'angle de la plaque. Cette méthode assure que la charge reste verticale tout au long de l'essai.

Des éléments ressorts sont utilisés dans le modèle pour représenter les tiges d'ancrages. Une prétension est appliquée directement dans la définition de l'élément `*ELEMENT_DISCRETE` en attribuant la valeur de la déformation initiale à la variable `OFFSET`.

Les charges requises pour initialiser le modèle sont appliquées en mode de relaxation dynamique. Ce mode sert exclusivement à appliquer les charges et déplacements pour l'initiation du modèle. Pendant la relaxation dynamique, les charges sont appliquées graduellement et le taux d'amortissement est augmenté par un facteur de 10 pour améliorer la convergence.

5.4.2 Chargement quasi-statique du modèle 1

La méthode explicite de LS-DYNA n'est pas optimum pour effectuer des analyses statiques. Cependant, la calibration d'un modèle statique est faite dans le but d'avoir un modèle dynamique et parce que certaines options disponibles dans le code explicite ne sont pas disponibles dans le code implicite et vice-versa. Le code explicite est tout de même utilisé pour modéliser l'essai quasi-statique.

Pour diminuer le temps de calcul, le taux de chargement est augmenté. Pour minimiser les impacts sur les résultats, les matériaux n'ont pas de facteur d'augmentation de la résistance en fonction du taux de déformation et l'énergie cinétique du modèle est vérifiée pour s'assurer qu'elle reste négligeable comparé à l'énergie élastique. Une autre option disponible est d'ajouter de la masse au modèle pour diminuer le pas de temps critique.

Ceci est possible avec la commande `*CONTROL_TIMESTEP`. Cette méthode a été testée, mais nécessitait une augmentation trop importante de la masse pour diminuer le temps de calcul.

Lors du chargement, le déplacement est imposé au chevêtre à l'aide d'une plaque rigide à chacune de ses extrémités (figure 5.12). Elles sont reliées par deux éléments ressorts ayant une rigidité similaire aux barres d'acier utilisées en laboratoire. Une tension initiale de 20 kN est appliquée dans chaque ressort pour éviter que les plaques glissent pendant l'analyse et tombent. Le déplacement est imposé avec la commande `*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID`. La figure 5.13 présente la courbe de chargement du premier modèle. Le chargement du modèle est grandement simplifié comparé au chargement en laboratoire pour diminuer le temps de calcul et limiter l'instabilité du modèle de béton tel que discuté à la section 5.2.

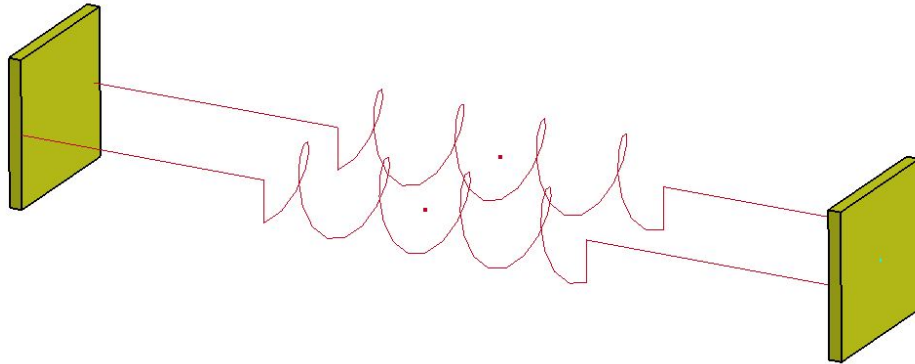


Figure 5.12 Structure de chargement du modèle 1

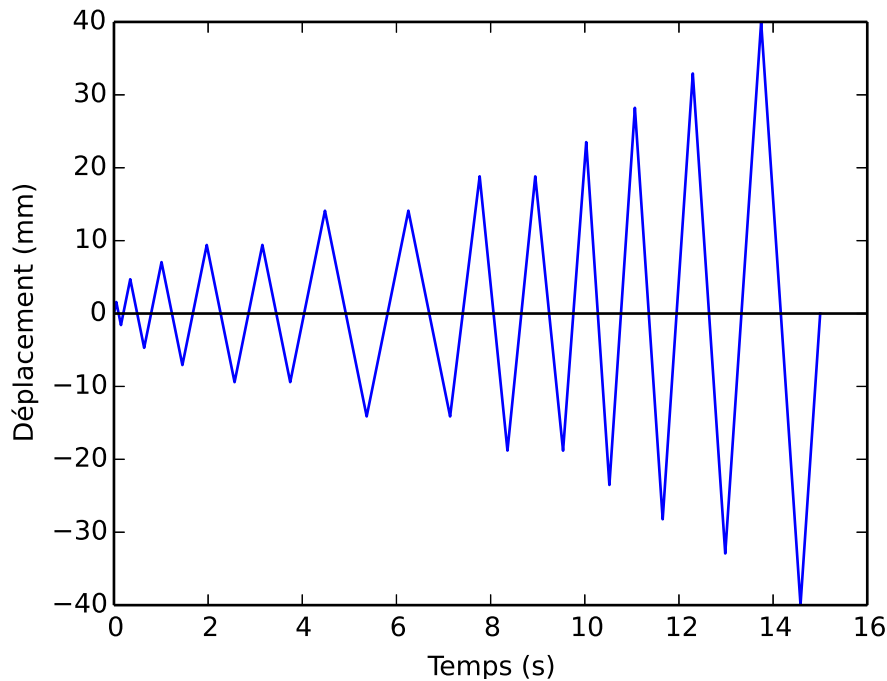


Figure 5.13 Chargement du modèle 1

5.4.3 Chargement dynamique du modèle 2.1

Contrairement aux deux autres modèles, le modèle 2.1 est chargé en imposant une force dynamique. La courbe de chargement est discutée à la section 4.4.5 et présentée à la figure 4.16. La force est appliquée également sur les deux éléments rigides représentant la superstructure avec la commande `*LOAD_RIGID_BODDY`.

La superstructure est idéalisée à l'aide d'éléments discrets de type ressorts et amortisseurs, d'éléments solides rigides et d'éléments masses tels qu'illustrés à la figure 5.14. Les 6 ressorts utilisent le matériau `*MAT_SPRING_ELASTIC` d'une rigidité de 136,8 N/mm pour une rigidité totale de 820,8 N/mm. Les 6 amortisseurs utilisent le matériau `*MAT_DAMPER_VISCOUS` avec $C = 0,2426$ correspondant à 2 % de l'amortissement critique du système à un degré de liberté. La masse provient des deux pièces rigides et des éléments masses situés au niveau du centre de masse de la superstructure.

5.4.4 Chargement dynamique du modèle 2.2

Le modèle 2.2 utilise une structure de chargement semblable au modèle 1. En plus des deux plaques rigides et des ressorts représentant la structure de chargement, l'ajout d'une

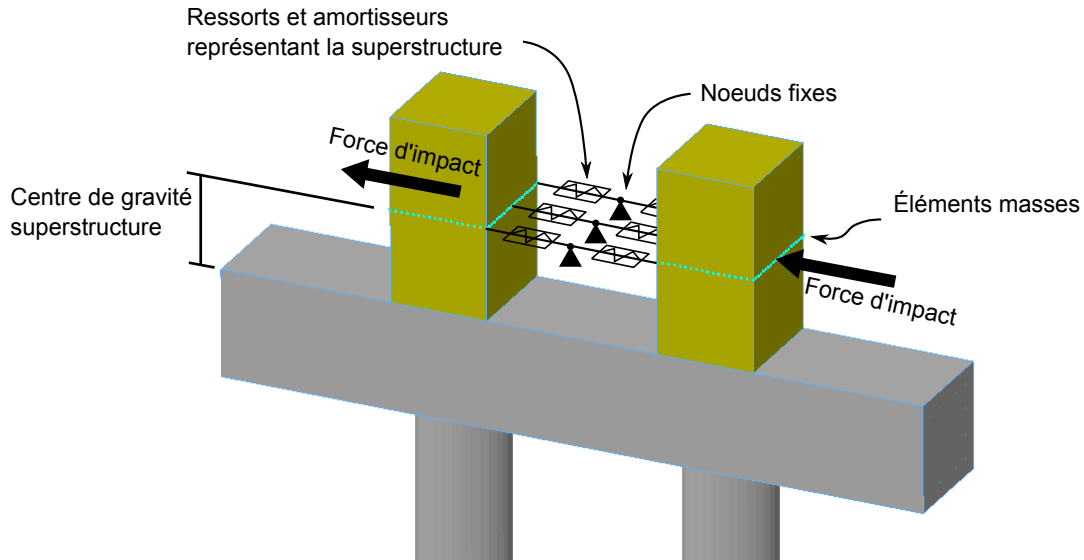


Figure 5.14 Modélisation de la superstructure

deuxième plaque d'éléments rigides permet de représenter le vérin (voir figure 5.15). Cette plaque est liée à la plaque du chevêtre à l'aide d'un élément contact de type `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK`. Le but de cette configuration est d'utiliser l'élément contact entre les plaques rigides comme cellule de charge. De cette façon, la réponse dynamique de la masse de la structure de chargement est incluse dans les résultats tels que mesurés lors de l'essai en laboratoire. Cette plaque n'est pas nécessaire dans le modèle 1, car la masse de la structure de chargement n'influence pas les résultats quasi-statiques.

La courbe de chargement imposée au modèle 2.2 est présentée à la figure 5.16. Elle correspond au déplacement du chevêtre obtenu lors de l'essai en laboratoire de la pile 02.

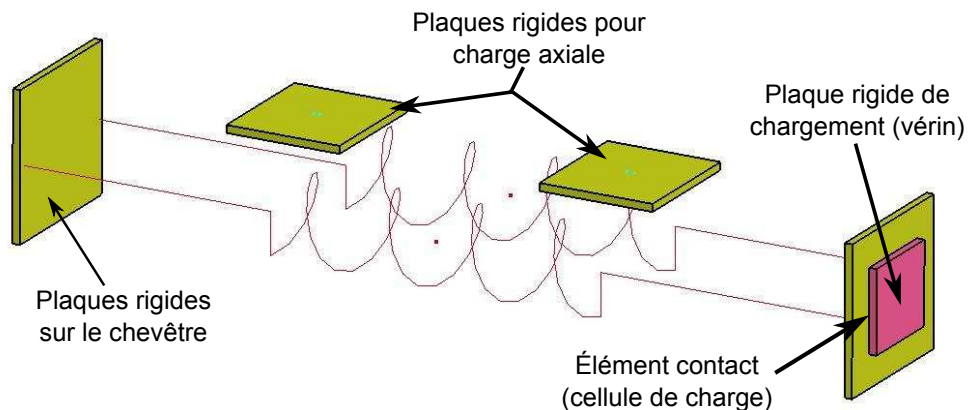


Figure 5.15 Structure de chargement du modèle 2.2

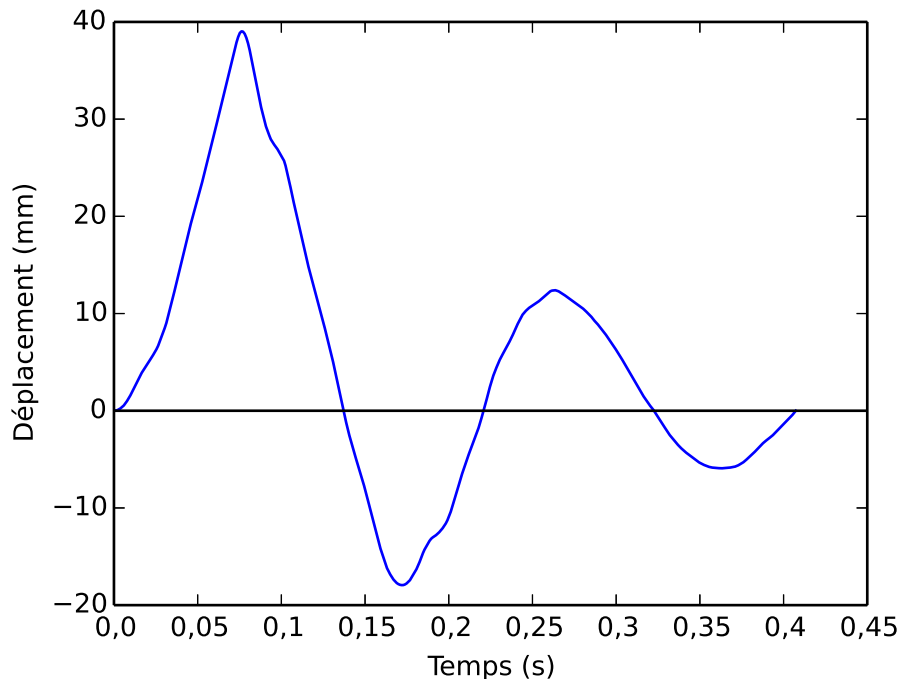


Figure 5.16 Chargement modèle 2.2

5.5 Stabilité des modèles et amortissement

5.5.1 Énergie d'hourglass

Les modèles numériques utilisent des éléments solides à un point d'intégration. Ces éléments sous-intégrés ont l'avantage d'être rapides à calculer, ne sont pas sujets au blocage en cisaillement, mais possèdent des modes qui n'engendrent aucune contrainte dans l'élément [LSTC, 2013a]. Ces modes créent une énergie de dissipation parasite appelée énergie d'hourglass. Des exemples de ces modes sont présentés à la figure 5.17. Il est suggéré de limiter l'énergie d'hourglass sous les 10 % de l'énergie interne [LSTC inc. et DYNAmore GmbH, 2016].

La commande *HOURGLASS_HOURGLASS est utilisée pour contrôler l'énergie d'hourglass. Différents algorithmes sont disponibles dans LS-DYNA. La méthode ayant donné les meilleurs résultats est la méthode par rigidité de Flanagan-Belytschko ($IHQ = 5$) avec le facteur d'hourglass $QM = 0,03$. Il est suggéré d'utiliser un facteur d'hourglass QM entre 0,03 et 0,05 [LSTC inc. et DYNAmore GmbH, 2016]. Cette méthode ajoute de la rigidité aux noeuds pour empêcher la vibration. Un facteur QM trop élevé risque d'augmenter la rigidité du modèle.

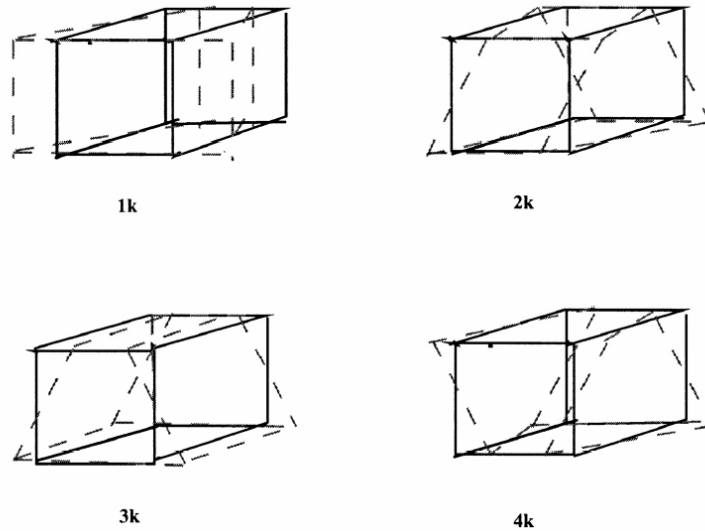


Figure 5.17 Modes d'hourglass [LSTC, 2013a]

5.5.2 Conditions limites

La dalle du laboratoire est représentée par une plaque d'élément rigide fixe. Les contraintes des éléments rigides sont définies à même le matériau. Pour se faire, $CMO = 1$ et $CM1 = CM2 = 7$ dans la commande `*MAT_RIGIDE` ce qui a pour effet de fixer les déplacements et les rotations dans les directions x , y et z . La semelle de la pile est reliée à la dalle avec la commande `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` avec un coefficient de friction $FS = 0,45$ pour empêcher le glissement de la pile. Pour empêcher la semelle de se soulever, les tiges d'ancrages sont représentées avec des éléments ressorts d'une rigidité de 187000 N/mm précontraintes à 20 kN . Ces valeurs sont attribuées arbitrairement pour éviter tous déplacements de la semelle. Cette méthode de fixation de la pile s'est avérée réduire énormément l'énergie de hourglass comparé à une technique plus simple consistant à fixer les noeuds de la semelle avec la commande `*BOUNDARY_SPC_SET`. Les éléments rigides et les ressorts utilisés sont simples et n'augmentent pas de beaucoup le temps de calcul. La figure 5.18 présente les éléments ressorts et solides utilisés dans le modèle 2.2.

5.5.3 Amortissement

L'amortissement dans le modèle est fixé autour de 2% de l'amortissement critique pour la plage de fréquences de la structure. La méthode d'amortissement de Rayleigh est utilisée avec les commandes `*DAMPING_PART_MASS` pour l'amortissement sur la masse et `*DAMPING_PART_STIFFNESS` pour l'amortissement sur la rigidité. La matrice de

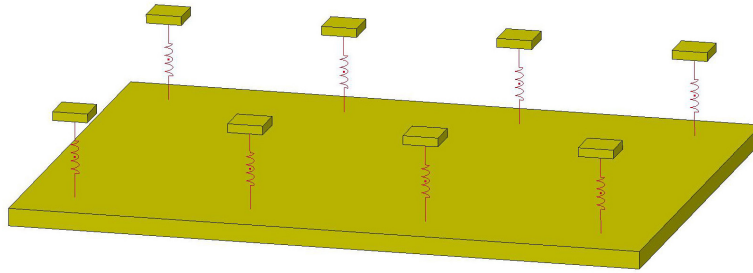


Figure 5.18 Conditions limites (Pile 02)

rigidité C est définie par l'équation $C = a_0M + a_1K$. Le taux d'amortissement ξ_i pour une fréquence ω_i est défini par l'équation :

$$\xi_i = \frac{a_0}{2\omega_i} + \frac{a_1\omega_i}{2} \quad (5.6)$$

La plage de fréquences désirée est définie entre 31,4 rad/s (fréquence angulaire du pont émulé) et 120,6 rad/s (fréquence angulaire de la pile seule). En posant $\xi_i = \xi_j = 0,02$ pour $\omega_i = 31,4$ et $\omega_j = 120,6$ on obtient $a_0 = 0,997$ et $a_1 = 2,63E - 4$. Les valeurs de a_0 et a_1 sont introduit dans *DAMPING_PART_MASS et *DAMPING_PART_STIFFNESS respectivement.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSULTATS

6.1 Essai quasi-statique (modèle 1 et essai 1)

L'essai 1 vise à caractériser la pile en effectuant un test quasi-statique. Un modèle numérique de la pile est calibré avec les résultats obtenus. Un chargement cyclique incrémenté est imposé à la pile jusqu'à la rupture. Les sections ci-dessous présentent les résultats de l'instrumentation ainsi que leur analyse. Finalement, ils sont comparés aux résultats du modèle numérique.

6.1.1 Validation du modèle 1

Le modèle numérique utilise des éléments solides sous-intégrés. Pour vérifier la validité des résultats du modèle, la quantité d'énergie d'hourglass doit rester faible comparativement à l'énergie interne du modèle. La figure 6.1 présente le pourcentage de l'énergie d'hourglass sur l'énergie interne pour chaque pièce du modèle affectée par celle-ci. Les poteaux 1 et 2 se situent au-dessus de la limite recommandée de 10 %. Malgré tout les résultats concordent bien avec l'essai.

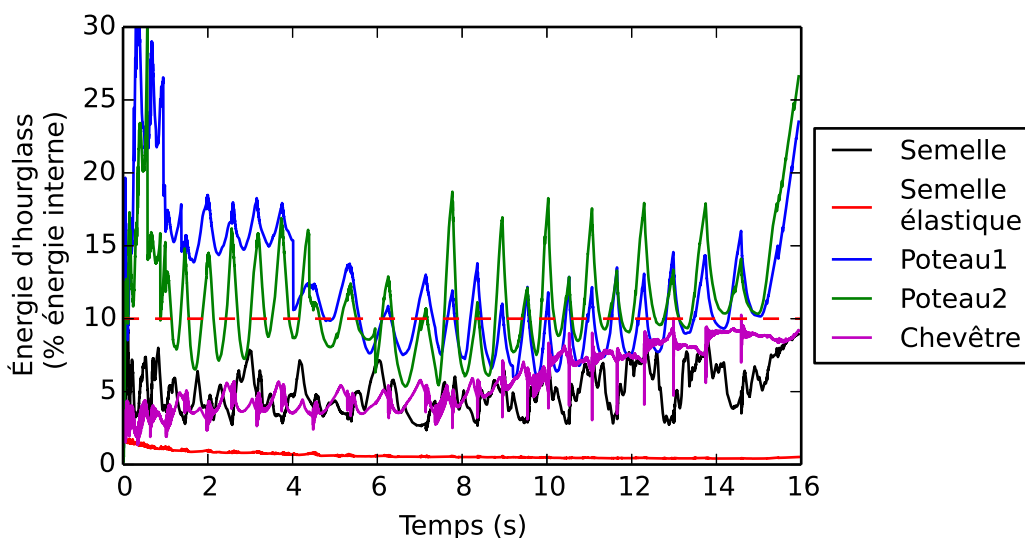


Figure 6.1 Graphique de l'énergie d'hourglass du modèle 1

La vitesse de chargement du modèle a été augmentée pour diminuer le temps de calcul. Cependant l'énergie cinétique du modèle doit rester négligeable. Voir la section 5.4.2 pour plus de détails. La figure 6.2 présente le pourcentage de l'énergie cinétique par rapport à l'énergie interne pour les principales pièces. L'énergie cinétique des poteaux reste négligeable comparée à leur énergie interne. Par contre, l'énergie cinétique du chevêtre est élevée. Ceci est attribuable au fait que le chevêtre se déplace beaucoup et ne subit pas beaucoup de déformation. Comme la déformation et la résistance de la pile viennent principalement des poteaux, la quantité d'énergie cinétique est jugée acceptable. De plus, le graphique 6.3 présente l'énergie interne et l'énergie cinétique globales du modèle par rapport à l'énergie totale. Sur ce graphique, on peut observer que l'énergie cinétique globale est négligeable par rapport à l'énergie totale et l'énergie interne du modèle. Diminuer davantage la vitesse de chargement aurait pu aider à diminuer la quantité d'énergie cinétique, mais cela augmente le temps de calcul du modèle.

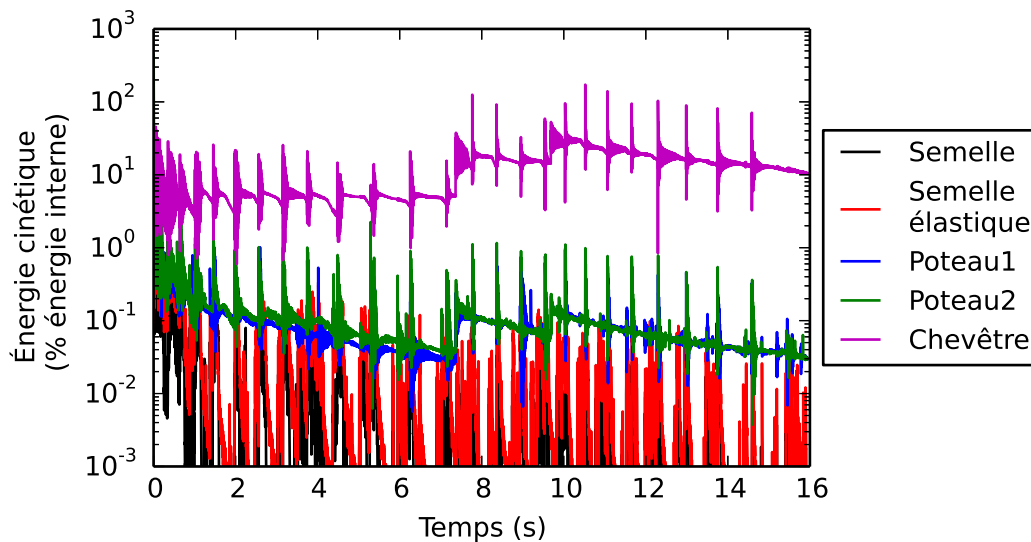


Figure 6.2 Graphique de l'énergie cinétique des pièces du modèle 1

6.1.2 Analyse visuelle de l'endommagement

Les figures 6.4 et 6.5 présentent des photos de la pile 1 suite à l'essai. Il est possible d'observer que l'endommagement de la pile est limité. Les poteaux 1 et 2 possèdent deux fissures dans le bas et une fissure dans le haut. Il est à noter que le chargement est fait par incrément de 2,35 mm alors que la pile possède une limite élastique de $\Delta_y = 4,90$ mm. Les fissures du haut sont apparues dès le premier cycle. Les fissures près de la dalle ont été observées à $2,88\Delta_y = 14,1$ mm. Elles sont probablement survenues avant, mais elles n'étaient pas visibles. Leur emplacement et l'épaisse couche de peinture à cet endroit

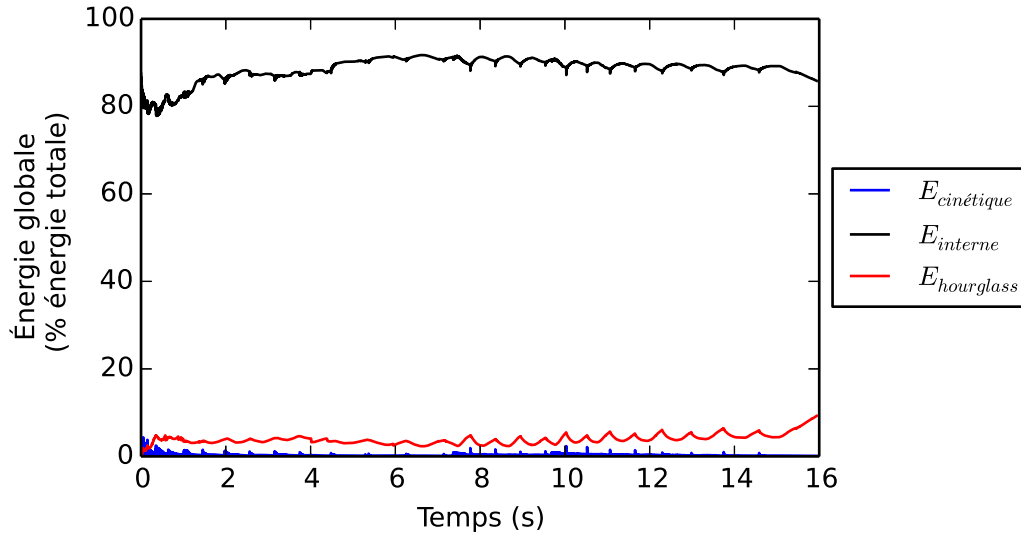


Figure 6.3 Graphique de l'énergie globale du modèle 1

auraient pu masquer la fissure au début de l'essai. Les deuxièmes fissures en bas des poteaux sont apparues à $1,91\Delta_y = 9,4$ mm. Aucune fissure n'est apparue sur le chevêtre ou sur la semelle.

L'endommagement en compression observable sur les poteaux est principalement survenu lors de l'essai de renversement. Ceci explique l'absence d'endommagement du béton en compression sur certaines faces des poteaux. L'absence de charge axiale sur les poteaux peut aussi expliquer le faible endommagement en compression.

Lors des derniers cycles de chargement ainsi que pendant l'essai de renversement, des bruits de frottement laissant croire un glissement des barres d'armatures étaient audibles. Ceci permettrait d'expliquer les ouvertures de fissures importantes à la fin de l'essai et le peu d'endommagement en compression.

La figure 6.6 présente l'endommagement du modèle de béton. Le béton en gris a un endommagement inférieur à 1 donc il n'a pas atteint la résistance maximale. L'échelle de couleur présente le béton qui est endommagé, 1 étant la résistance maximum et 2 étant la résistance résiduelle. Voir section 5.2 pour plus de détails sur le modèle d'endommagement.

Le modèle montre une fissure en haut et en bas de chaque poteau, mais contrairement à l'essai, seulement le poteau 2 présente une 2^e fissure dans le bas. La figure 6.6(a) présente le modèle lorsque le déplacement du chevêtre atteint un maximum de 4,7 mm. Ceci est le point le plus près de la limite élastique de la pile. À ce point, seulement les fissures du haut et du bas des poteaux sont présentes. La deuxième fissure dans le bas du poteau 2 est apparue au même moment que l'essai, soit au cycle $1,91\Delta_y = 9,4$ mm. Cette fissure est

visible à la figure 6.6(b) illustrant le modèle lorsque la force du vérin est à son maximum. Ceci correspond à $2,88\Delta_y = 14,1$ mm. À partir de ce moment, les cycles subséquents présentent un endommagement progressif du modèle de béton de manière irréaliste. La figure 6.6(c) et (d) présente bien cette progression. La figure (c) à $5,8\Delta_y = 28,2$ mm présente une rupture en cisaillement en haut du poteau 1. Cette dernière n'est pas présente dans l'essai, mais à ce point, l'endommagement est rendu irréaliste.

6.1.3 Résultats des jauges, LVDTs et potentiomètres

Résultats des jauges sur les armatures

Les barres d'armatures sont instrumentées à l'aide de jauges de déformation. Leur emplacement est présenté à la figure 4.6. Les résultats de certaines jauges de déformation sont présentés ci-dessous. Les résultats de toutes les jauges sont présentés à l'annexe C.1.1. La limite élastique des armatures illustrée sur les graphiques est de 498 MPa. Ceci équivaut à une déformation de $2478 \mu\text{def}$ selon les résultats présentés à la section 4.3.3.

Les résultats numériques des jauges 16 et 26 situées sur les barres longitudinales du chevêtre ainsi que les jauges 21, 22 et 23 situées sur les armatures de confinement en haut du poteau 2 sont non concluantes considérant leur précision par rapport à l'ordre de grandeur des déformations mesurées. Pour plus de détail, voir la section 6.3.5.

Les jauges 10 et 20, situées dans la semelle sur les armatures longitudinales des poteaux 1 et 2 respectivement, présentent des résultats similaires. Une déformation maximale de $2002 \mu\text{def}$ et $1751 \mu\text{def}$ dans les poteaux 1 et 2 respectivement. Il est à noter que ces déformations sont survenues à la limite élastique de la pile. À ce moment, les jauges ont brisé et les résultats sont erronés. Leur déformation maximum a probablement augmenté au cours de l'essai. Les résultats des jauges 10 et 20 sont présentés aux figures 6.7 et 6.8 respectivement.

Les jauges 14 et 24, situées sur les armatures longitudinales dans le bas des poteaux 1 et 2, atteignent des déformations maximales de $2583 \mu\text{def}$ et $2345 \mu\text{def}$ respectivement. Ces déformations maximales étant près de la limite élastique indiquent qu'il y a eu plastification de l'armature dans le bas du poteau. On remarque que le modèle LS-DYNA présente un comportement similaire quoique moins rigide que l'essai. Les résultats des jauges 14 et 24 sont présentés aux figures 6.9 et 6.10 respectivement.



Vue du côté gauche, endommagement en compression



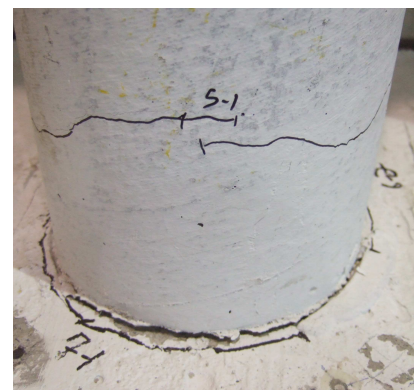
Agrandissement vue en élévation, haut du poteau 1



Poteau 1, vue en élévation



Vue du côté gauche, endommagement en compression



Agrandissement vue en élévation, bas du poteau 1

Figure 6.4 Endommagement du poteau 1 de la pile 01 suite à l'essai



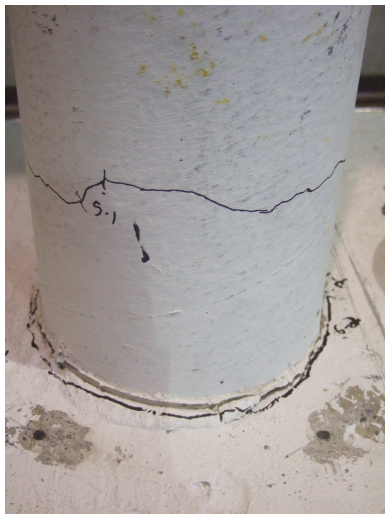
Agrandissement vue en élévation, haut du poteau 2



Poteau 2, vue en élévation



Vue du côté droit, importante ouverture de fissure



Agrandissement vue en élévation, bas du poteau 2



Vue du côté droit, endommagement en compression

Figure 6.5 Endommagement du poteau 2 de la pile 01 suite à l'essai

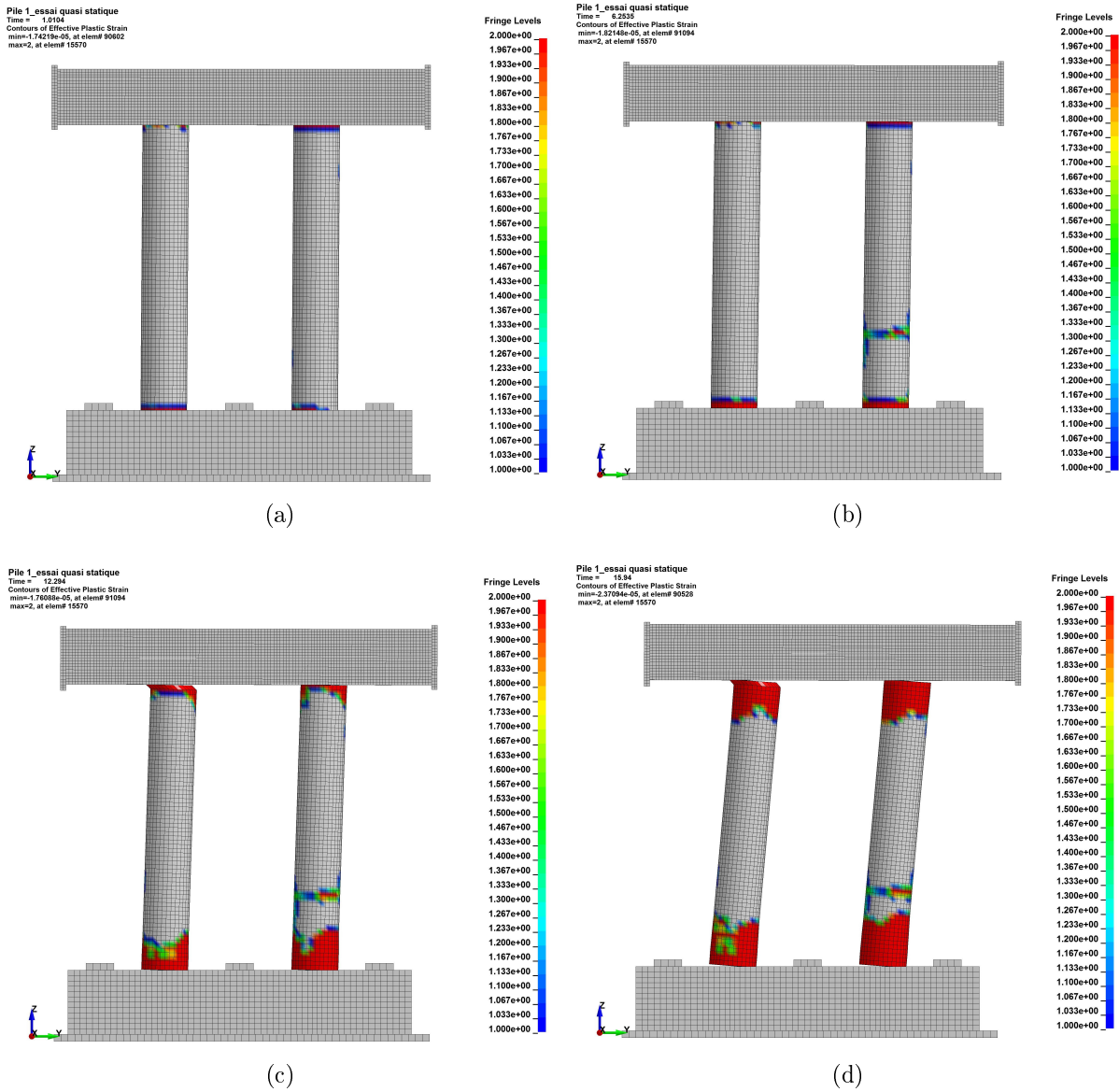


Figure 6.6 Endommagement du modèle numérique 1 : (a) limite élastique $\Delta = 4,7$ mm, (b) force maximale $\Delta = 14,1$ mm, (c) rupture en cisaillement $\Delta = 28,2$ mm, (d) fin de l'essai de renversement $\Delta = 90$ mm

Les jauges 15 et 25, situées sur les armatures longitudinales dans le haut des poteaux 1 et 2, atteignent des déformations élevées, mais sous la limite élastique pour une grande partie de l'essai. Seulement la jauge 25 s'approche de la limite élastique lors de l'essai de renversement. Ceci laisse croire qu'il n'y a pas eu plastification de l'armature du haut lors des essais cycliques ou même une perte d'adhérence. Le modèle LS-DYNA présente un comportement plastique à des déformations bien inférieures à la limite élastique démontrant qu'il y a eu perte d'ancrages des barres dans le modèle. Les résultats des jauges 15 et 25 sont présentés aux figures 6.11 et 6.12 respectivement.

Les jauges 11 à 13, situées sur les armatures de confinement dans le bas du poteau 1, indiquent de faibles déformations lors de l'essai. Des déformations maximales variant entre $10 \mu\text{def}$ et $200 \mu\text{def}$. Ces mêmes jauges dans le modèle numérique indiquent de faibles déformations lors de l'essai sauf lors des 3 ou 4 derniers cycles. Cette déformation est attribuable à l'instabilité du modèle d'endommagement du béton qui est rendu au niveau des armatures de confinement instrumentées. Ceci survient lors des cycles avec un déplacement maximum supérieur à 23,5 mm.

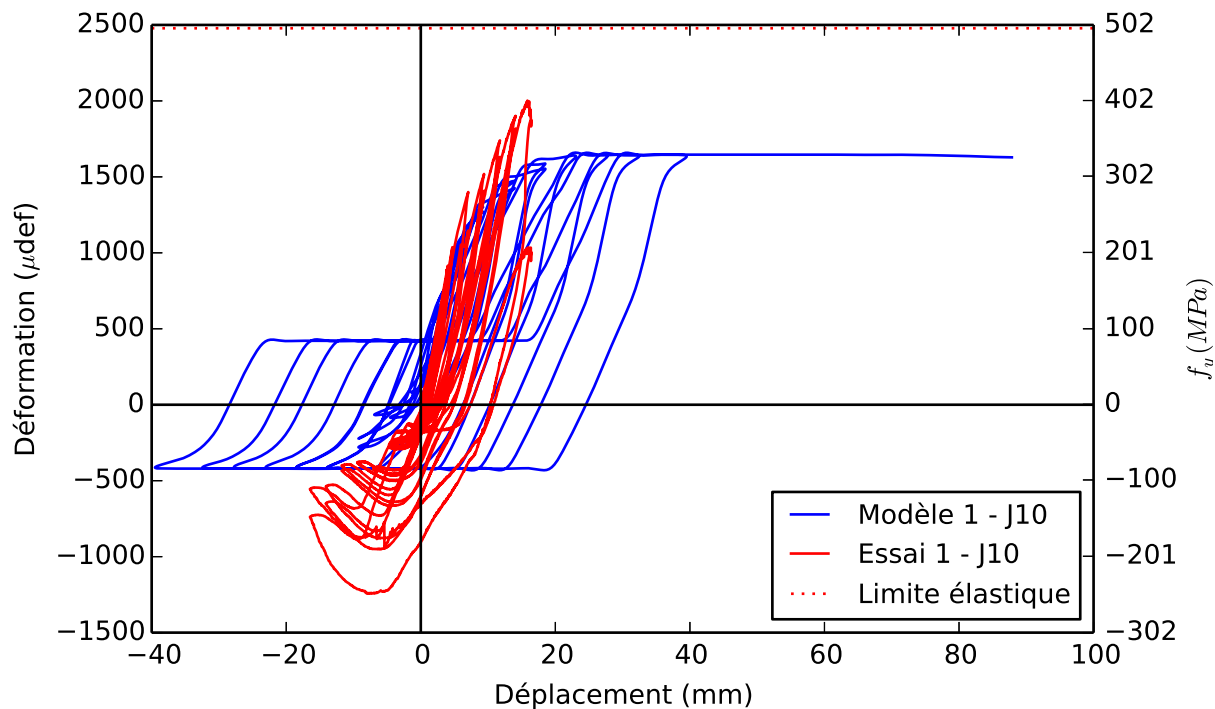


Figure 6.7 Graphique des résultats de la jauge 10 de l'essai 1

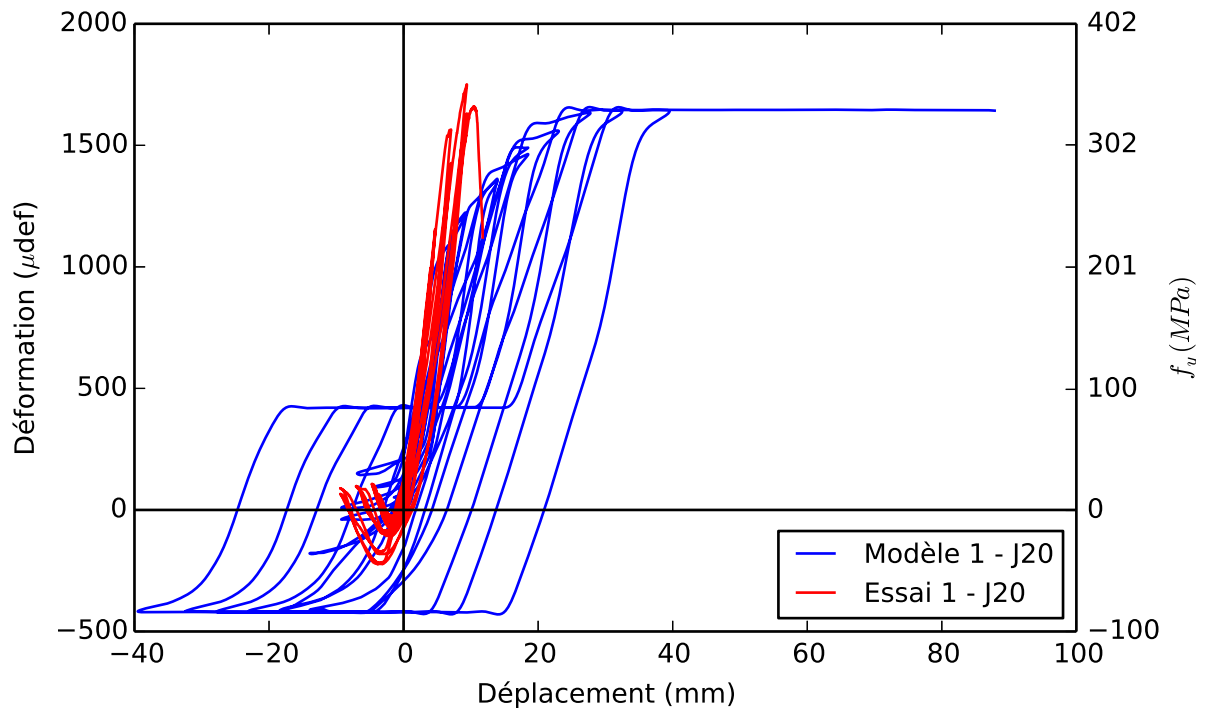


Figure 6.8 Graphique des résultats de la jauge 20 de l'essai 1

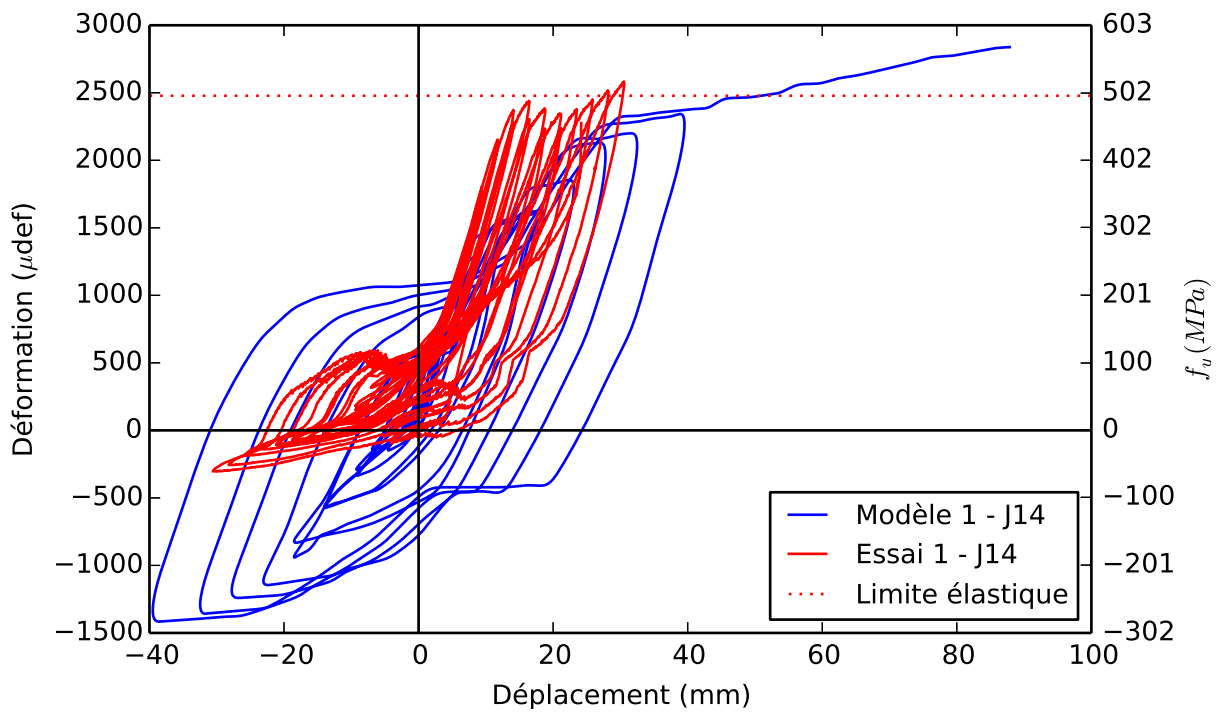


Figure 6.9 Graphique des résultats de la jauge 14 de l'essai 1

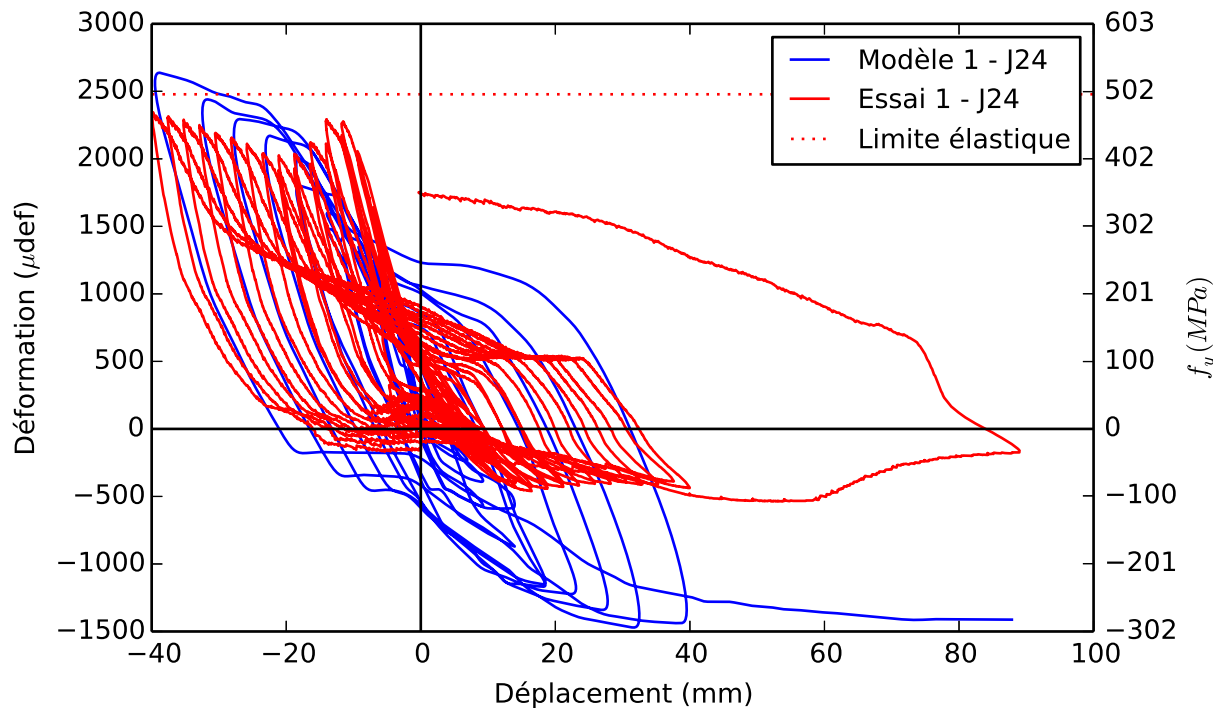


Figure 6.10 Graphique des résultats de la jauge 24 de l'essai 1

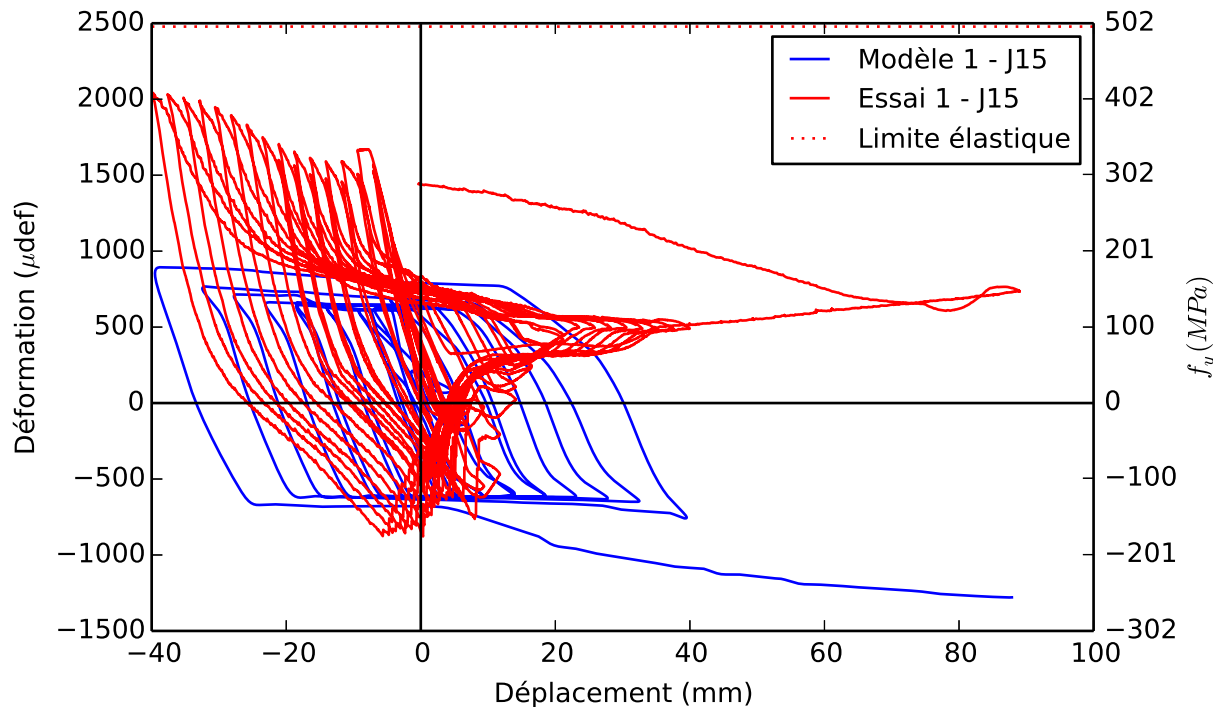


Figure 6.11 Graphique des résultats de la jauge 15 de l'essai 1

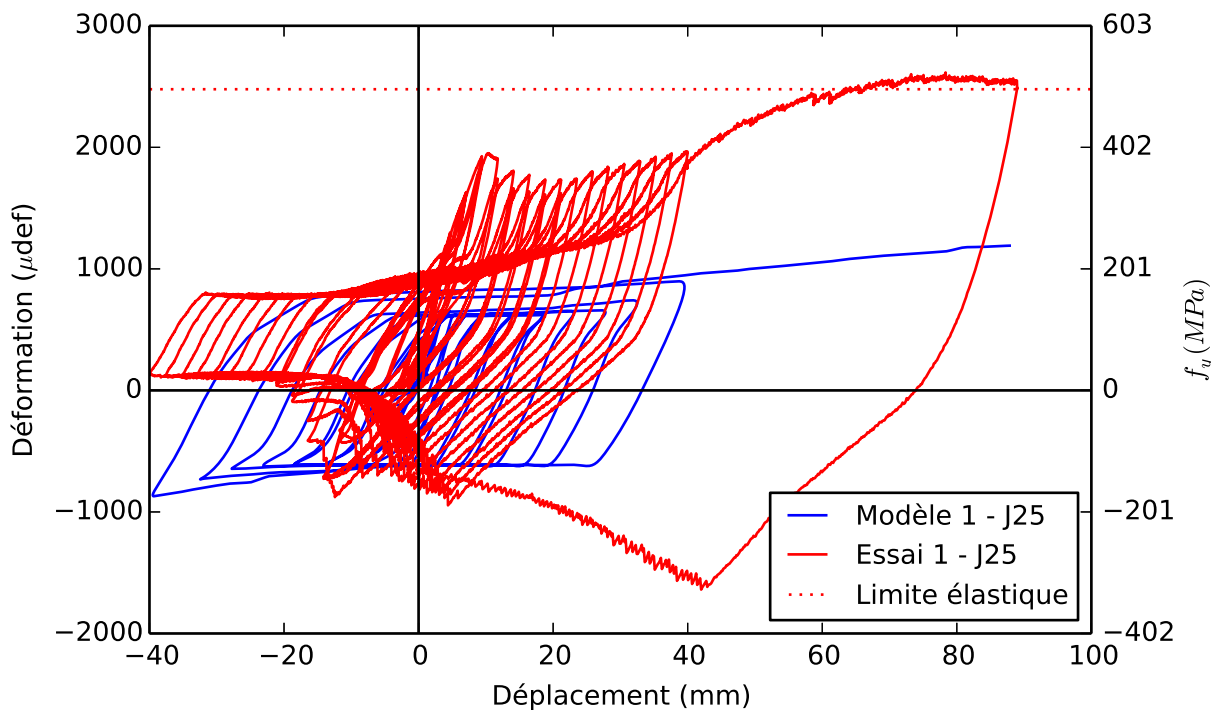


Figure 6.12 Graphique des résultats de la jauge 25 de l'essai 1

Résultats des LVDTs en rosette

Deux rosettes constituées de 5 *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs) sont installées sur le chevêtre au niveau des poteaux. Les déformations présentes dans les rosettes sont inférieures à la précision des LVDTs. Les déformations enregistrées sont donc faibles ou nulles. Les résultats de ces instruments ne sont donc pas présentés en annexe. Les LVDTs sont remplacés par des jauges à béton pour l'essai 2.

Résultats des potentiomètres sur les poteaux

Les poteaux sont munis de 2 anneaux comportant chacun 4 potentiomètres. Un anneau est situé dans le bas et l'autre dans le haut du poteau. Les potentiomètres sont fixés à la dalle et ils servent à mesurer la rotation et le déplacement vertical des poteaux. L'emplacement des potentiomètres est illustré à la figure 4.5. Les résultats de la rotation et du déplacement vertical du poteau 1, mesurés avec les anneaux de potentiomètres, sont présentés aux figures 6.13 à 6.16 et 6.17 à 6.20 respectivement.

Étant donné que le cas de chargement du modèle 1 est une version simplifiée et accélérée de l'essai, leurs résultats ne concordent pas dans le temps. Les résultats du modèle sont donc segmentés et le temps est mis à l'échelle pour que les résultats concordent avec les cycles et les déplacements de l'essai 1.

Le modèle 1 et l'essai 1 présentent des résultats de la rotation du poteau pratiquement identiques. Les résultats du déplacement vertical diffèrent légèrement. On remarque que les résultats du modèle 1 sont légèrement supérieurs aux valeurs obtenues en laboratoire. Cet écart est plus marquant sur le poteau 1 que le poteau 2.

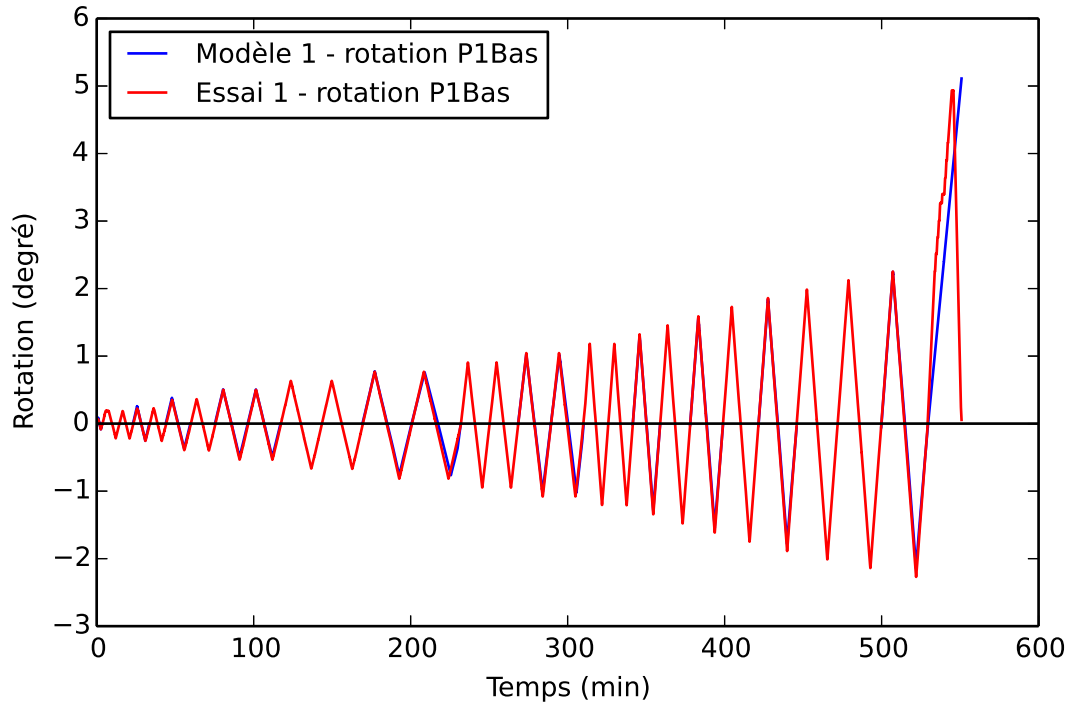


Figure 6.13 Graphique de la rotation du poteau 1 bas de l'essai 1

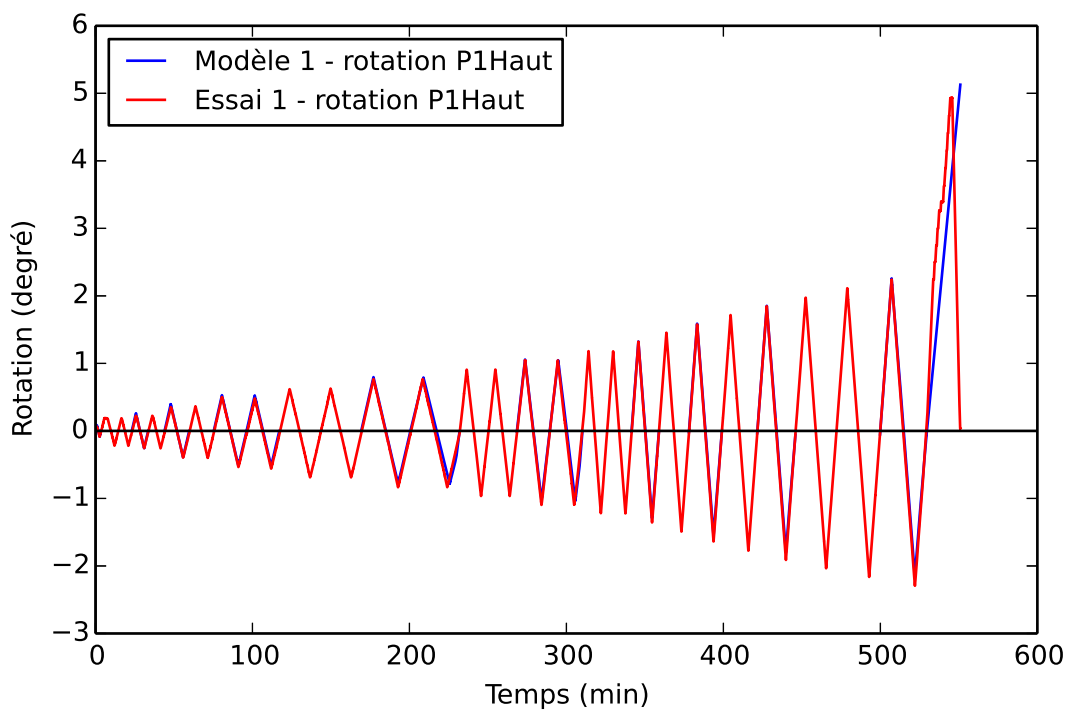


Figure 6.14 Graphique de la rotation du poteau 1 haut de l'essai 1

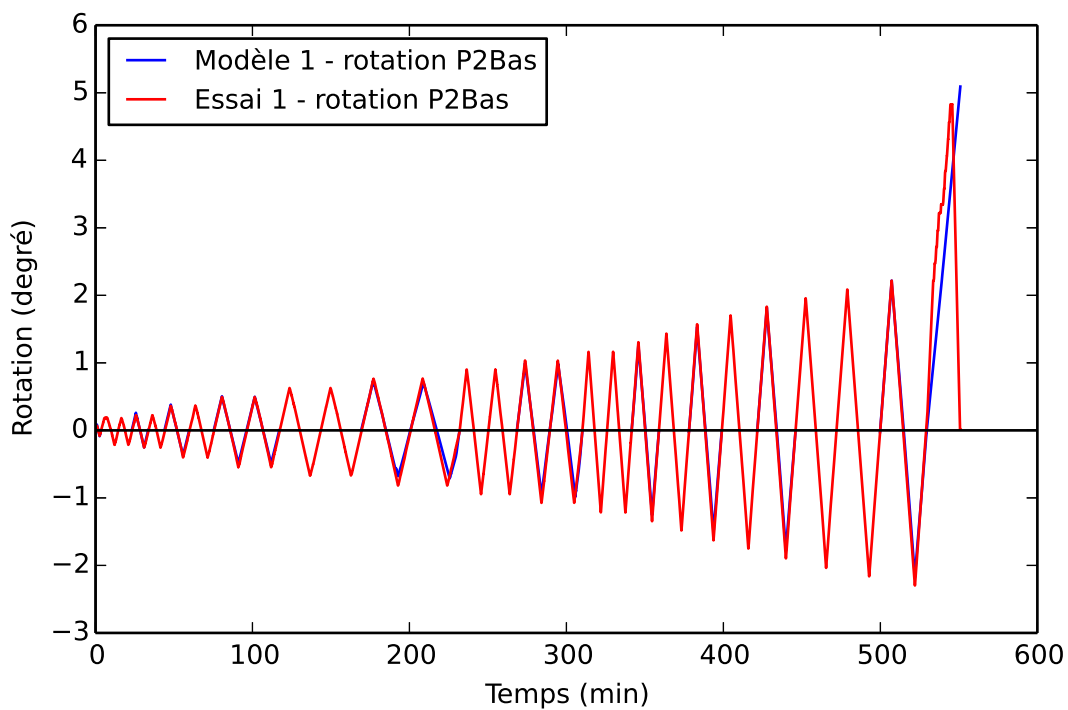


Figure 6.15 Graphique de la rotation du poteau 2 bas de l'essai 1

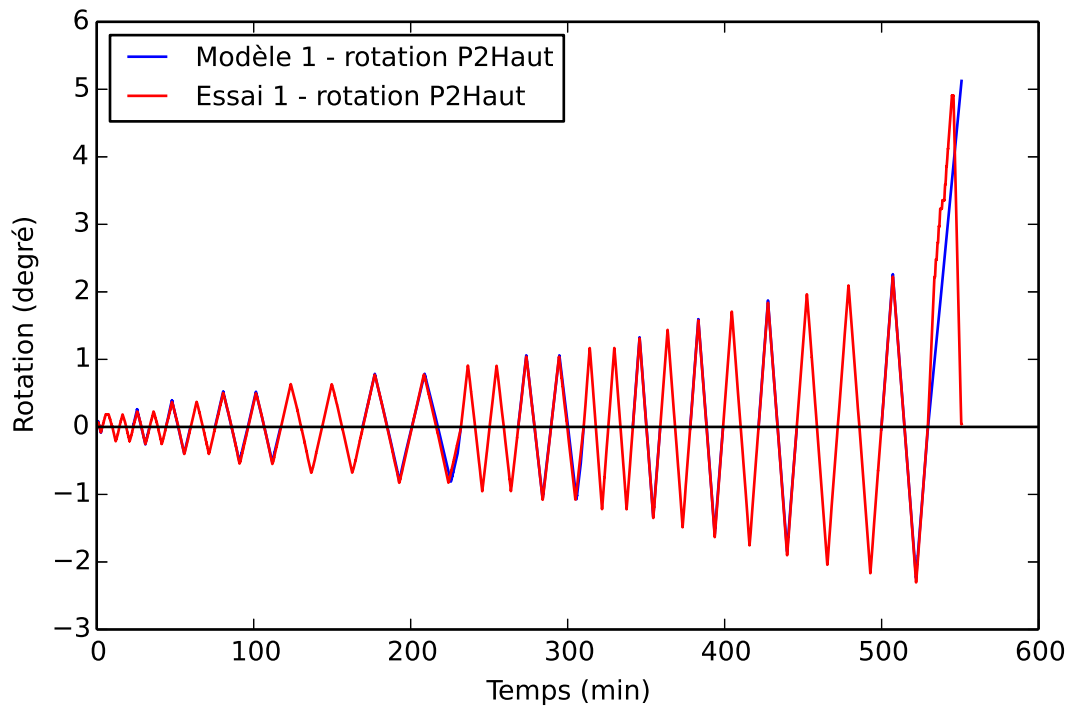


Figure 6.16 Graphique de la rotation du poteau 2 haut de l'essai 1

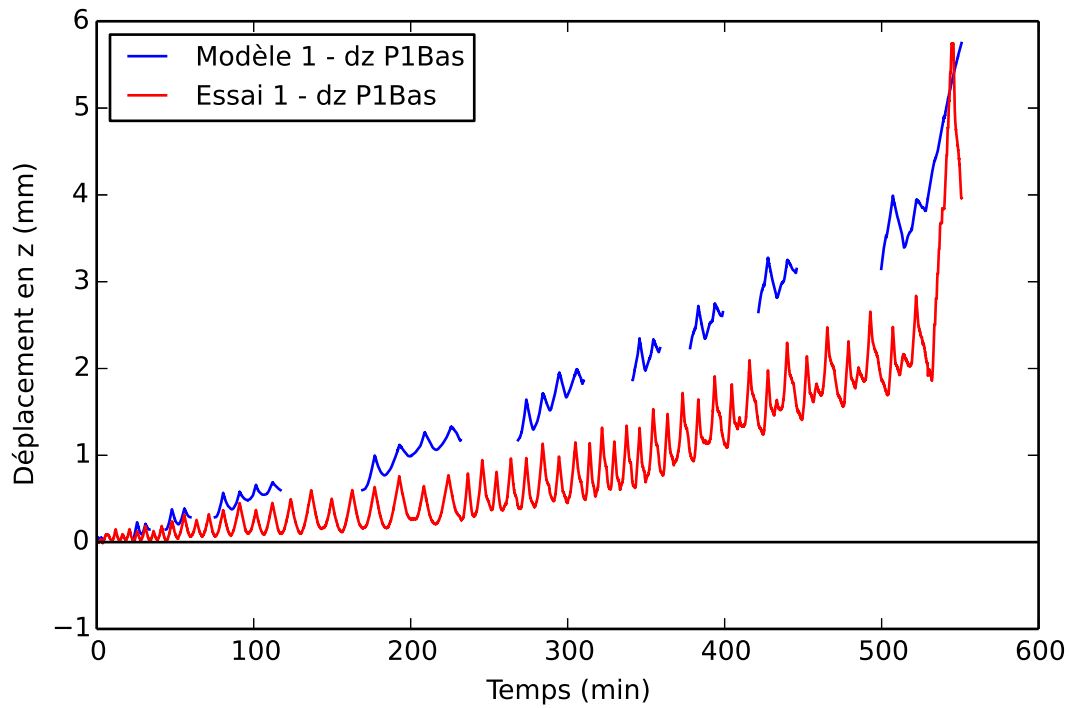


Figure 6.17 Graphique du déplacement vertical du poteau 1 bas de l'essai 1

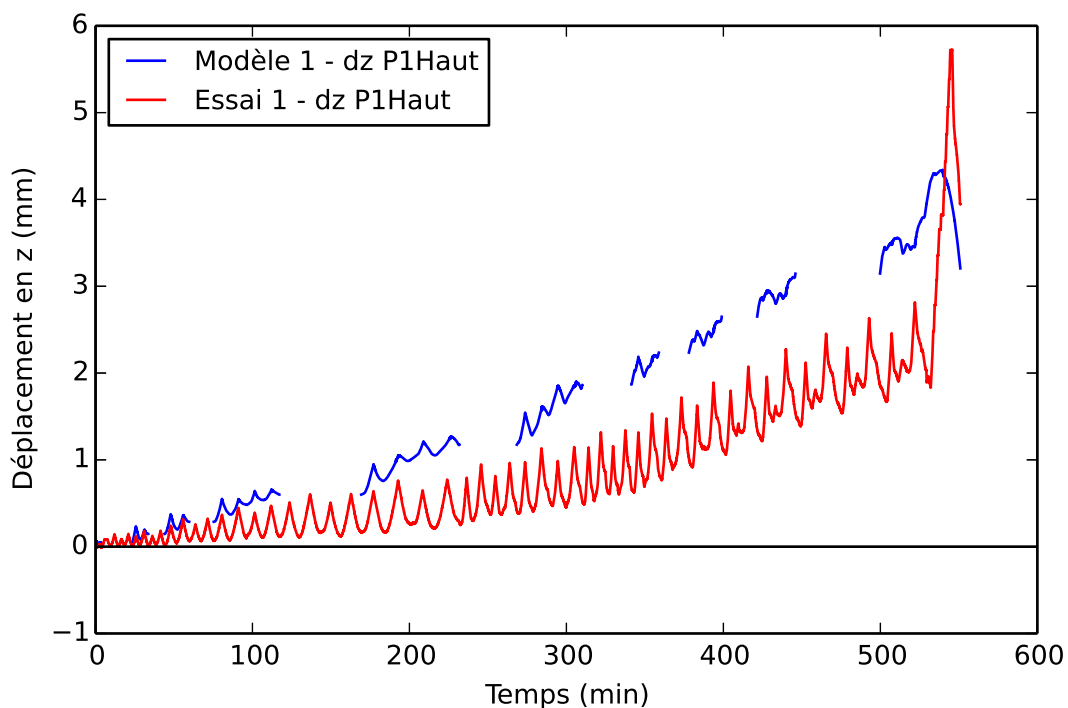


Figure 6.18 Graphique du déplacement vertical du poteau 1 haut de l'essai 1

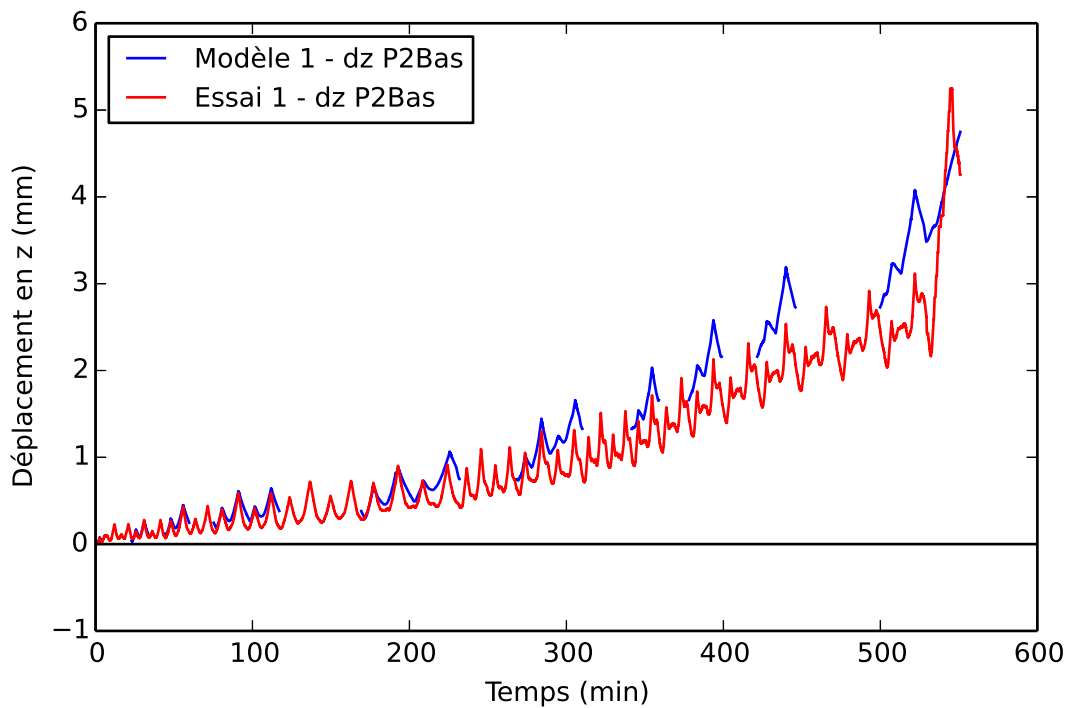


Figure 6.19 Graphique du déplacement vertical du poteau 2 bas de l'essai 1

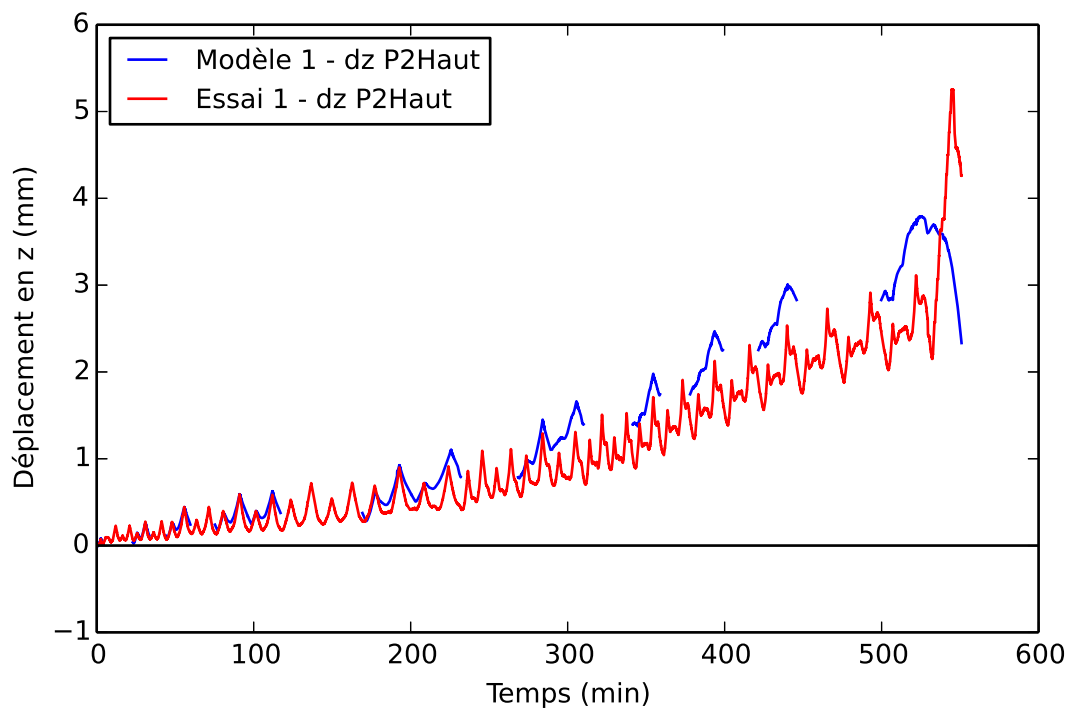


Figure 6.20 Graphique du déplacement vertical du poteau 2 haut de l'essai 1

Conclusion partielle sur les résultats de l'instrumentation

Les résultats de l'instrumentation démontrent qu'il y a eu plastification de l'armature dans la pile. Le modèle numérique représente généralement bien les résultats obtenus en laboratoire. Les barres d'armature instrumentées dans le haut des poteaux démontrent un signe de plastification dans l'essai, mais il pourrait aussi y avoir eu glissement des barres. D'un autre côté, le modèle subit des pertes d'ancrage dans le haut des poteaux. Malgré tout, les résultats obtenus après l'ajout d'éléments contact permettant le glissement des barres donnent un modèle plus réaliste. La diminution du nombre de fissures et de l'endommagement du béton du modèle avec glissement des armatures a permis de conclure que le glissement avait un impact sur les résultats. Finalement, les jauges sur les armatures de confinement démontrent que le modèle peut devenir instable et subir un endommagement excessif vers la fin de l'essai.

6.1.4 Courbes d'hystérésis

La relation force-déplacement est appelée courbe d'hystérésis. Celle-ci permet d'illustrer la ductilité du modèle (Δ/Δ_y) et l'énergie dissipée par la structure. Les figures 6.21 et 6.22 présentent les courbes d'hystérésis de la force du vérin en fonction du déplacement imposé au chevêtre pour l'essai 1 et pour le modèle numérique 1. La première figure présente un agrandissement des premiers cycles tandis que la deuxième présente l'essai en entier incluant le renversement.

On peut observer que le modèle numérique représente bien les valeurs expérimentales pour les premiers cycles. Par la suite, la résistance du modèle diminue légèrement tandis que l'essai continue à gagner en résistance. La diminution de résistance du modèle concorde avec la propagation de l'endommagement irréaliste dans le modèle de béton. Le modèle numérique est légèrement plus rigide, mais la force maximale est bien répliquée. Finalement, l'énergie dissipée est plus importante dans le modèle numérique que dans l'essai.

Les résultats de l'essai peuvent être représentés par une courbe bilinéaire. Cette dernière se caractérise par un déplacement de 4,90 mm et d'une force de 12,76 kN à la limite élastique. La rigidité élastique est de 2,60 kN/mm et la rigidité plastique est de $8,74 \cdot 10^{-2}$ kN/mm.

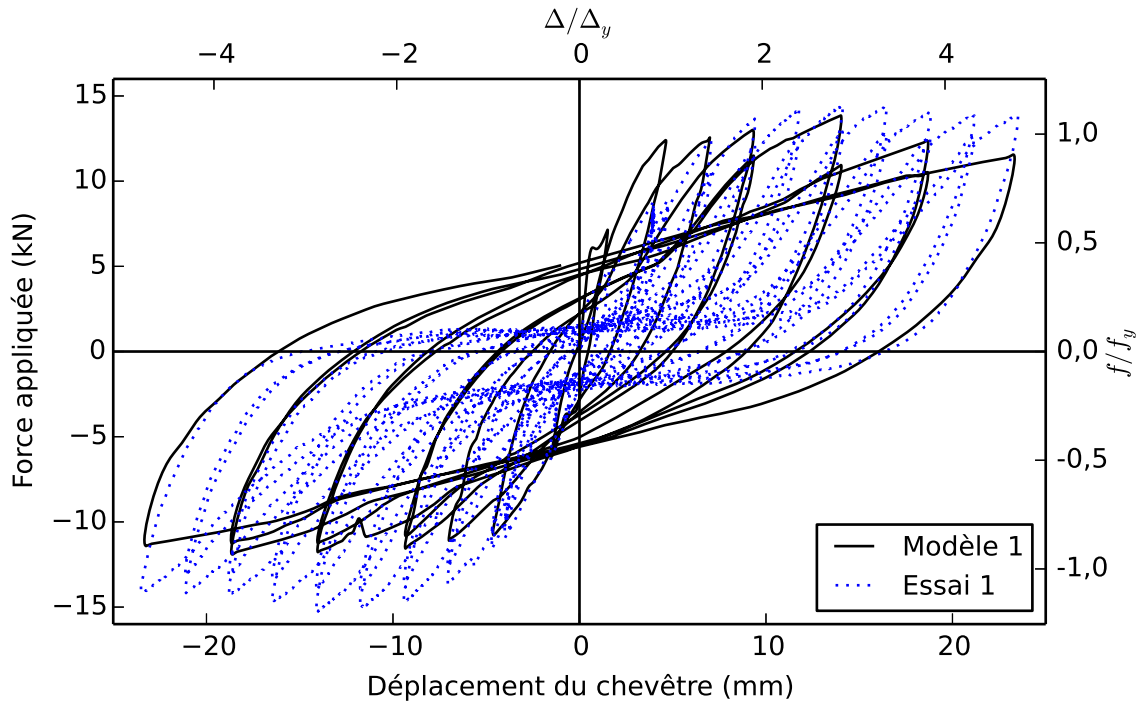


Figure 6.21 Comparaison de la courbe d'hystérésis du modèle 1 et de l'essai 1 : premiers cycles

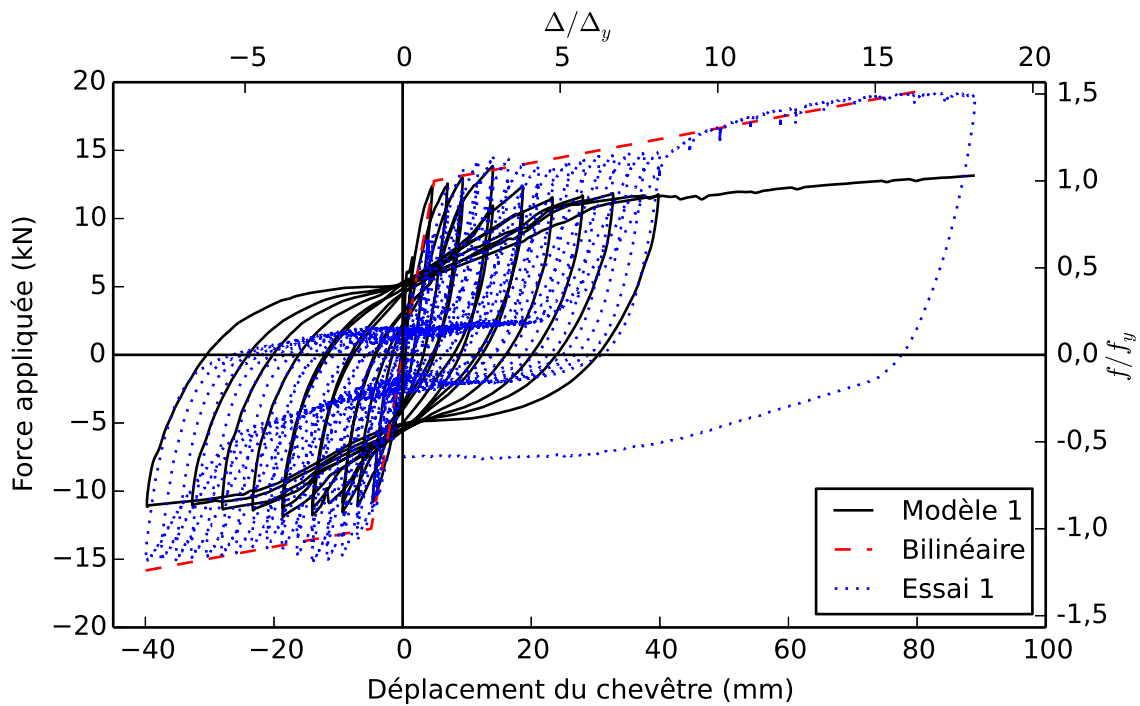


Figure 6.22 Comparaison de la courbe d'hystérésis du modèle 1 et de l'essai 1 : essai complet

6.1.5 Conclusion sur l'essai quasi-statique

Le premier essai a pour buts de caractériser l'échantillon en laboratoire et de valider la méthode expérimentale avec un type d'essai qui est fortement utilisée dans le domaine du génie civil. Les résultats en laboratoire sont satisfaisants et ont permis de déterminer que le glissement des barres d'armature pouvait être problématique. Le modèle numérique représente bien le comportement obtenu en laboratoire. La force maximale ainsi que l'endommagement du modèle de béton sont similaires aux résultats obtenus en laboratoire pour les premiers cycles. Cependant, un endommagement excessif et une perte de résistance du modèle sont observés après plusieurs cycles de chargement. Ceci entraîne une dissipation d'énergie excessive du modèle comparativement à ce qui est observé en laboratoire. Le fait que LS-DYNA et ses matériaux sont développés et optimisés pour des charges dynamiques de nature impulsive peut être en cause de certaines faiblesses du modèle quasi-statique. Ces faiblesses devraient avoir moins d'impact sur les résultats du deuxième essai qui se concentre sur les charges d'impact avec un essai dynamique.

6.2 Modélisation de la charge d'impact (modèle 2.1)

Un deuxième modèle numérique est créé pour modéliser l'impact d'un camion. Ce modèle est basé sur une version antérieure du modèle 1 calibré. Il a été modifié pour incorporer la superstructure du pont et il est adapté pour faire un essai dynamique. Le chargement consiste à 90 % de la force d'impact d'un camion semi-remorque appliqué au niveau du chevêtre. La réponse dynamique du chevêtre va par la suite servir de cas de chargement pour l'essai 2 en laboratoire. Voir le chapitre 5 pour plus de détails.

6.2.1 Validation du modèle 2.1

Le modèle numérique utilise des éléments solides sous-intégrés. Pour vérifier la validité des résultats du modèle, la quantité d'énergie d'hourglass doit rester faible comparative-ment à l'énergie interne du modèle. La figure 6.23 présente le pourcentage de l'énergie d'hourglass sur l'énergie interne pour chaque pièce du modèle affectée par celle-ci. Comme recommandé, l'énergie d'hourglass se situe principalement sous les 10 % à l'exception du poteau 2 qui atteint un peu plus de 90 % pour un très bref instant avant de revenir sous les 10 %. L'énergie d'hourglass est tout de même jugée acceptable et le modèle valable.

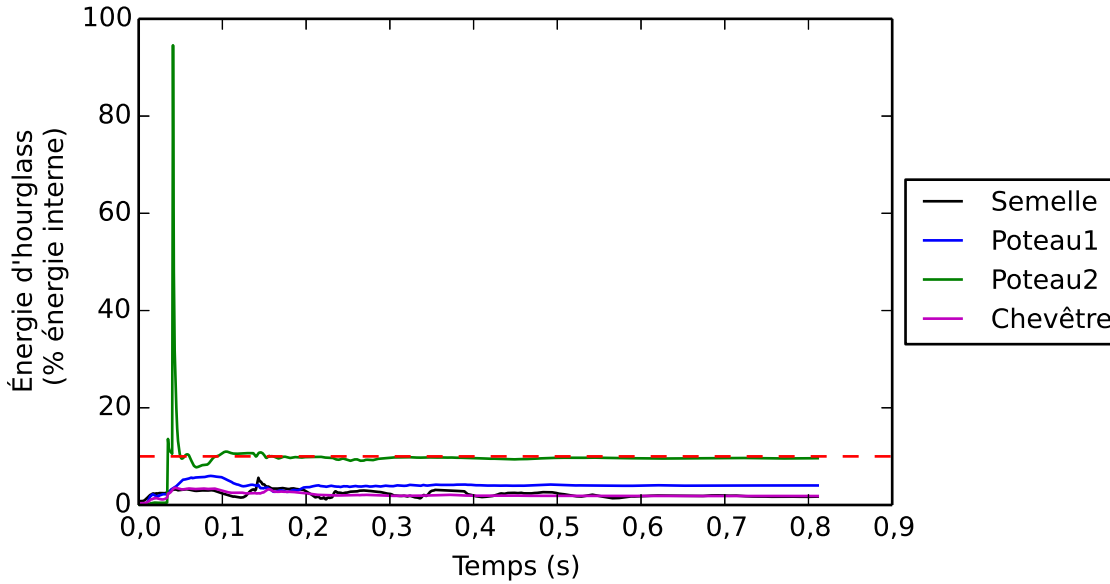


Figure 6.23 Graphique de l'énergie d'hourglass du modèle 2.1

6.2.2 Résultats du modèle 2.1

La figure 6.24 présente le déplacement, la vitesse et l'accélération du chevêtre en fonction du temps. Les résultats sont filtrés avec un filtre de type Butterworth passe-bas de 30 Hz d'ordre 5. Le résultat du déplacement en fonction du temps est le cas de chargement appliqué au deuxième essai en laboratoire. Il est caractérisé par une période de 0,182 s, une fréquence de 5,48 Hz et un amortissement de 18,0 % calculé à l'aide de la méthode du décrément logarithmique [Paultre, 2005].

6.2.3 Endommagement du modèle 2.1

L'endommagement à la fin de l'analyse du modèle 2.1 est présenté à la figure 6.25. Le béton en gris a un endommagement inférieur à 1 donc il n'a pas atteint la résistance maximale. L'échelle de couleur présente le béton qui est endommagé, 1 étant la résistance maximum et 2 étant la résistance résiduelle. Voir section 5.2 pour plus de détails sur le modèle d'endommagement. Le haut et le bas du poteau 1 ainsi que le haut du poteau 2 présentent seulement une fissure dans l'élément contact et peu de signes d'une rupture en compression du béton. Le bas du poteau 2 présente deux fissures ainsi qu'une légère rupture en compression. De plus, 2 fissures sont présentes sur le chevêtre vis-à-vis chacun des poteaux. Les résultats du deuxième essai, présentés dans la section suivante, présentent des dommages légèrement plus élevés. Notamment, deux fissures sont présentes en bas des

deux poteaux et des zones de rupture en compression sont présentes dans le haut et le bas de chaque poteau.

6.2.4 Conclusion sur l'essai 2.1

Malgré que le modèle 2.1 utilisé pour trouver le cas de chargement de l'essai 2 est basé sur une version préliminaire des modèles 1 et 2.2 et qu'il n'a pas été calibré avec des données dynamiques, l'endommagement est similaire aux observations faites en laboratoire.

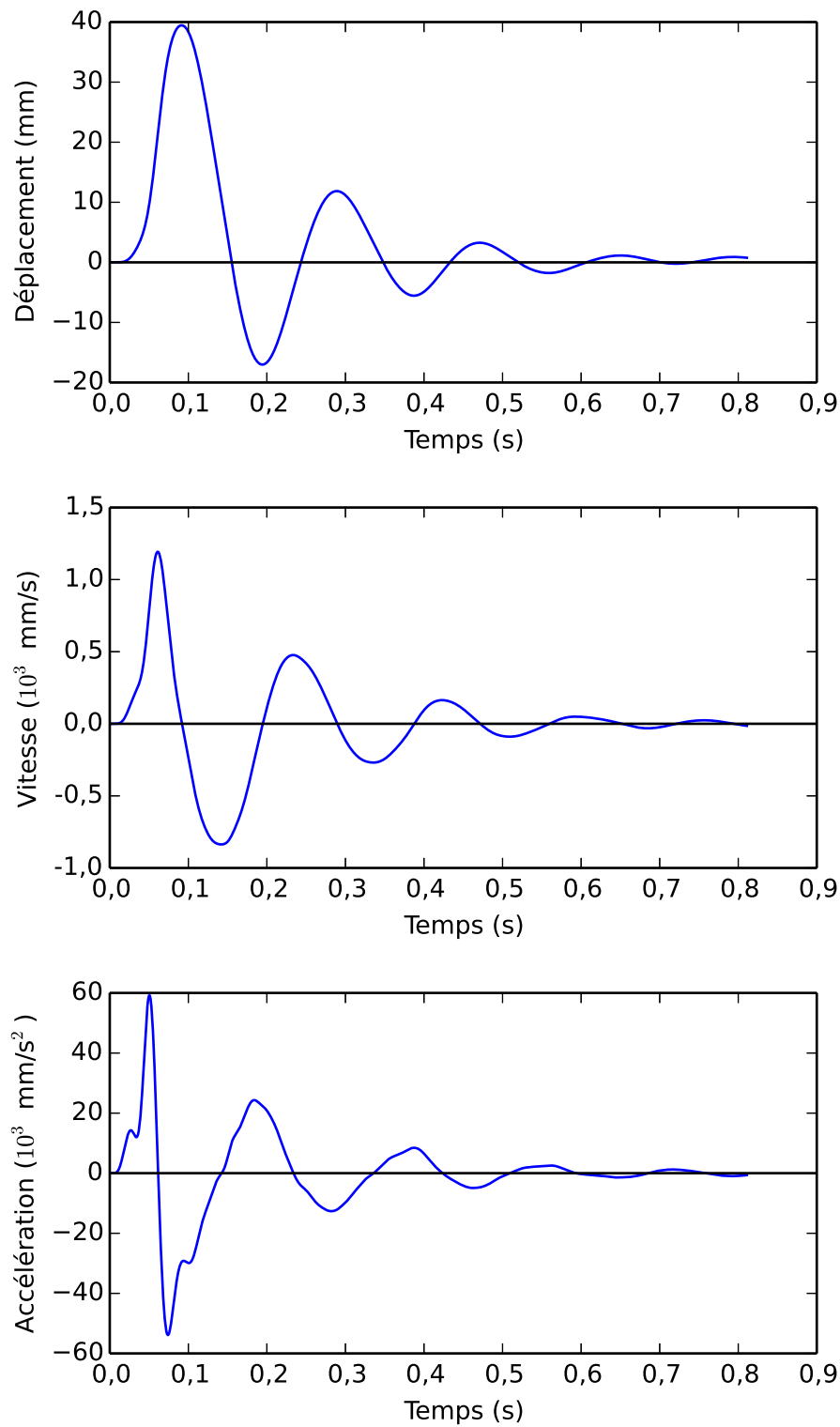
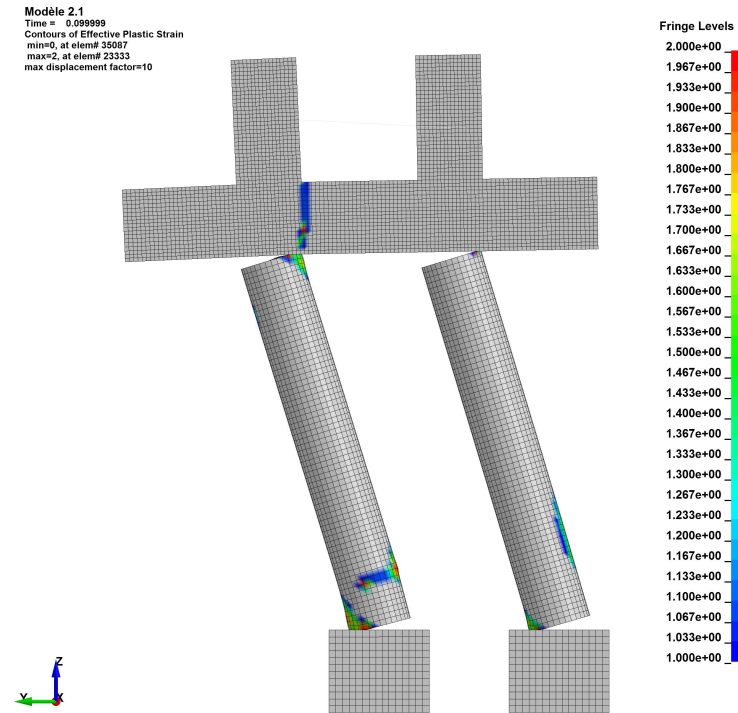
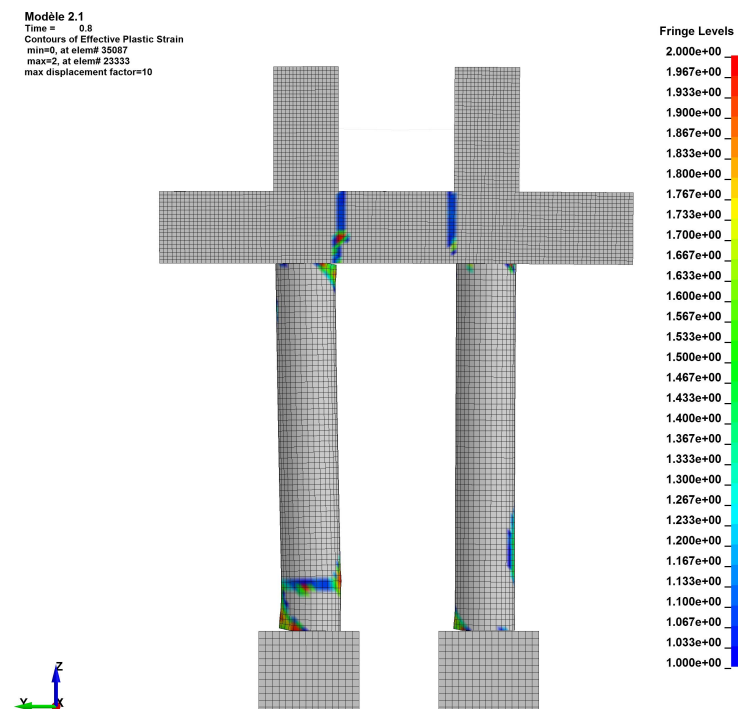


Figure 6.24 Graphique du déplacement, de la vitesse et de l'accélération du chevêtre en fonction du temps du modèle 2.1



(a)



(b)

Figure 6.25 Endommagement du modèle 2.1 (déplacements amplifiés par un facteur 10) : (a) $t = 0,1$ s, (b) à la fin de l'analyse

6.3 Charge d'impact (modèle 2.2 et essai 2)

Le deuxième essai en laboratoire consiste à une charge dynamique d'impact déterminé selon les résultats du modèle numérique 2.1. Suite à l'essai d'impact, d'autres essais dynamiques non destructifs sont effectués sur la pile pour caractériser ses propriétés dynamiques. Finalement, un modèle numérique 2.2 est calibré et comparé aux résultats obtenus en laboratoire.

6.3.1 Validation du modèle 2.2

Le modèle numérique utilise des éléments solides sous-intégrés. Pour vérifier la validité des résultats du modèle, la quantité d'énergie d'hourglass doit rester faible comparativement à l'énergie interne du modèle. La figure 6.26 présente le pourcentage de l'énergie d'hourglass sur l'énergie interne pour chaque pièce du modèle affectée par celle-ci. On y observe que le chevêtre et la semelle présentent une énergie d'hourglass atteignant 45 % de l'énergie interne pendant la 0,1 première seconde avant de redescendre sous les 10 %. Comme illustré à la figure 6.27, le chevêtre et la semelle possèdent moins d'énergie interne que les poteaux. L'impact de l'énergie d'hourglass sur l'ensemble du modèle est donc limité. De plus, les poteaux possèdent une énergie d'hourglass sous les 10 % recommandé. Les résultats sont donc valables.

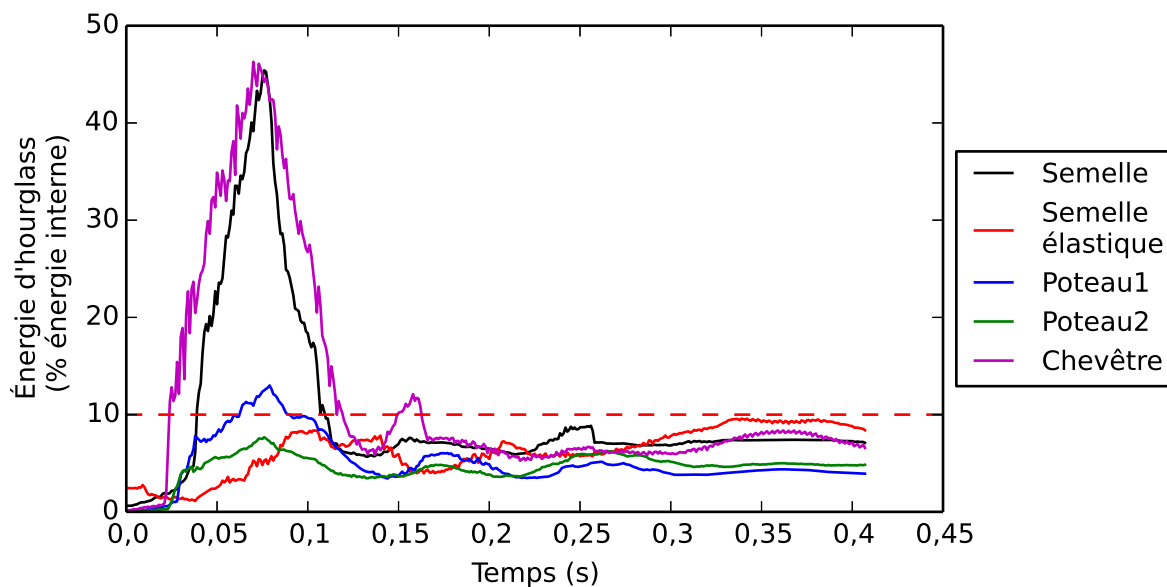


Figure 6.26 Graphique de l'énergie d'hourglass du modèle 2.2

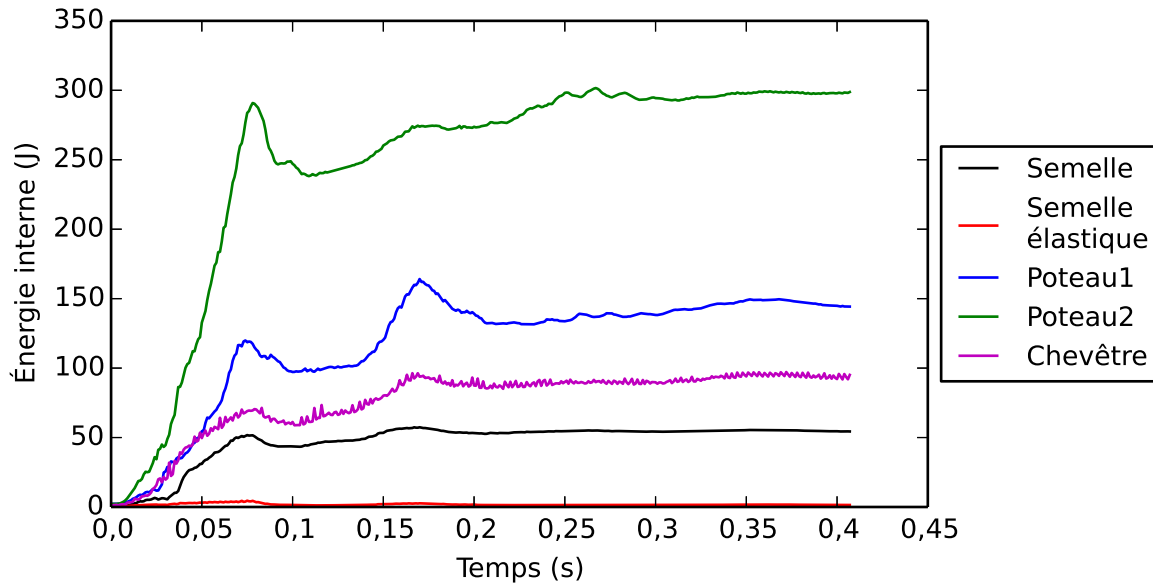


Figure 6.27 Graphique de l'énergie interne du modèle 2.2

6.3.2 Propriétés dynamiques de la pile 2

Après l'essai d'impact sur la pile 2, une série de déplacement sinusoïdale est imposée au chevêtre dans le but de déterminer ses propriétés statiques et dynamiques. Les sinus ont tous une amplitude de 2 mm et une fréquence variable. Les résultats représentent donc les propriétés endommagées de la pile.

Tout d'abord, un sinus d'une fréquence de 0,0125 Hz sert de référence quasi-statique et permet de déterminer la rigidité et l'énergie dissipée par hystérésis de la pile. La figure 6.28 présente la courbe force-déplacement de cet essai. La rigidité est déterminée en calculant la pente de l'ellipse force-déplacement et l'énergie dissipée est calculée par l'aire de l'ellipse. Cet essai permet de trouver une rigidité de 2,29 kN/mm et une dissipation d'énergie de 2,68 J/cycle.

Par la suite, des déplacements de forme sinusoïdale à des fréquences de 1, 2 et 3 Hz sont imposés à la pile. En idéalisant le comportement de la pile en un système à un degré de liberté dynamique, on peut comparer les résultats de la force du vérin à l'équation du mouvement dynamique :

$$p(t) = f_S(t) + f_D(t) + f_I(t) = ku(t) + c\dot{u}(t) + m\ddot{u}(t) \quad (6.1)$$

où $p(t)$ représente les forces externes, soit la force du vérin, f_S , f_D et f_I sont respectivement la force élastique due à une rigidité k , la force d'amortissement due à un amortissement c

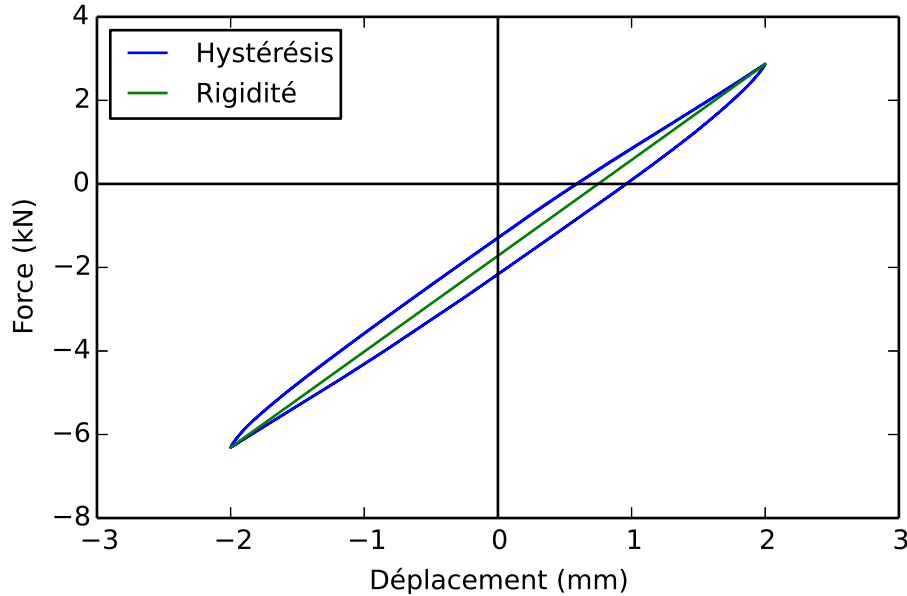


Figure 6.28 Propriétés quasi-statiques de la pile (sinus 0,0125 Hz)

et la force d'inertie due à une masse effective m . $u(t)$, $\dot{u}(t)$ et $\ddot{u}(t)$ sont le déplacement, la vitesse et l'accélération du chevêtre en fonction du temps. Le déplacement en fonction du temps est une valeur imposée au vérin et mesurée en laboratoire. La vitesse et l'accélération sont obtenues en dérivant le déplacement mesuré du vérin en fonction du temps.

L'énergie dissipée par hystérésis est proportionnelle au carré de l'amplitude du déplacement et indépendante de la fréquence. L'énergie dissipée pour l'essai quasi-statique peut donc être utilisée pour déterminer un amortissement visqueux équivalent c_{eq} défini par l'équation suivante [Paultre, 2005] :

$$c_{eq} = \frac{E_D}{\pi \bar{\omega} u_0^2} \quad (6.2)$$

où $\bar{\omega}$ est la fréquence angulaire du déplacement, u_0 l'amplitude du déplacement et E_D est l'énergie dissipée pour un cycle. En substituant $E_D = 2677$ Nmm, $\bar{\omega} = 2\pi \cdot f$ et $u_0 = 2$ mm dans l'équation, on obtient respectivement $c_{eq} = 33,9$, 17,0 et 11,3 Ns/mm pour une fréquence f de 1, 2 et 3 Hz.

Désormais, le seul inconnu de l'équation dynamique d'un système à un degré de liberté est la masse effective. La méthode des moindres carrés est utilisée pour trouver la masse effective qui correspond le mieux aux résultats expérimentaux. Pour ce faire, la commande `optimize.curve_fit` du module `scipy V0.12.0` de Python 2.7 est utilisée. Les résultats donnent une masse effective de 1,162, 0,656, 0,672 tonne pour une fréquence de 1, 2 et 3 Hz. La

valeur à 1 Hz est jugée erronée. À cette fréquence, la force d'inertie maximale représente 2,0 % de la force maximale du vérin comparativement à 4,7 % et 11,5 % pour 2 et 3 Hz. La masse effective moyenne pour 2 et 3 Hz est donc de 0,664 tonne.

6.3.3 Commande vs réponse du vérin

Pour réaliser un essai d'impact en laboratoire, le vérin se doit d'être capable de répliquer la commande qu'on lui impose. Préalablement à l'essai, le cas de chargement est testé dans le vide et les paramètres du vérin sont calibrés pour s'assurer que la réponse correspond à la commande. La figure 6.29 compare la réponse du vérin avec la commande lors de l'essai selon l'instrumentation interne du vérin et le potentiomètre attaché sur le chevêtre.

En observant cette figure, on remarque que le déplacement du chevêtre subit un certain déphasage comparativement à la commande lors du premier cycle. Les cycles subséquents concordent parfaitement avec la commande. Il est possible d'expliquer la provenance de cette déviation en observant la courbe de la vitesse en fonction du temps. On remarque que la vitesse du vérin plafonne autour de 700 mm/s alors que la commande requiert une vitesse maximale de 1250 mm/s pendant un bref instant. Ceci concorde avec les spectres du vérin pour une force de l'ordre de 45 kN. Lors du premier chargement, la forme de chargement prend donc une forme linéaire au lieu de la forme sinusoïdale souhaité. Le déplacement maximal est atteint au temps 0,0850 s au lieu de 0,0703 s, soit une erreur de 21 %. Néanmoins, le comportement du vérin représente bien la commande. Cependant, l'essai est au maximum de la capacité du vérin. Une pile plus résistante ne pourrait pas être testée avec le même cas de chargement, car la vitesse du vérin diminue en fonction de la force appliquée.

Il est possible de constater que les courbes du déplacement et de la vitesse de l'instrumentation interne du vérin sont superposées aux courbes du potentiomètre externe. Le jeu et les déformations dans l'assemblage sont donc négligeables. Le vérin peut donc être contrôlé avec son instrumentation interne sans introduire d'erreur.

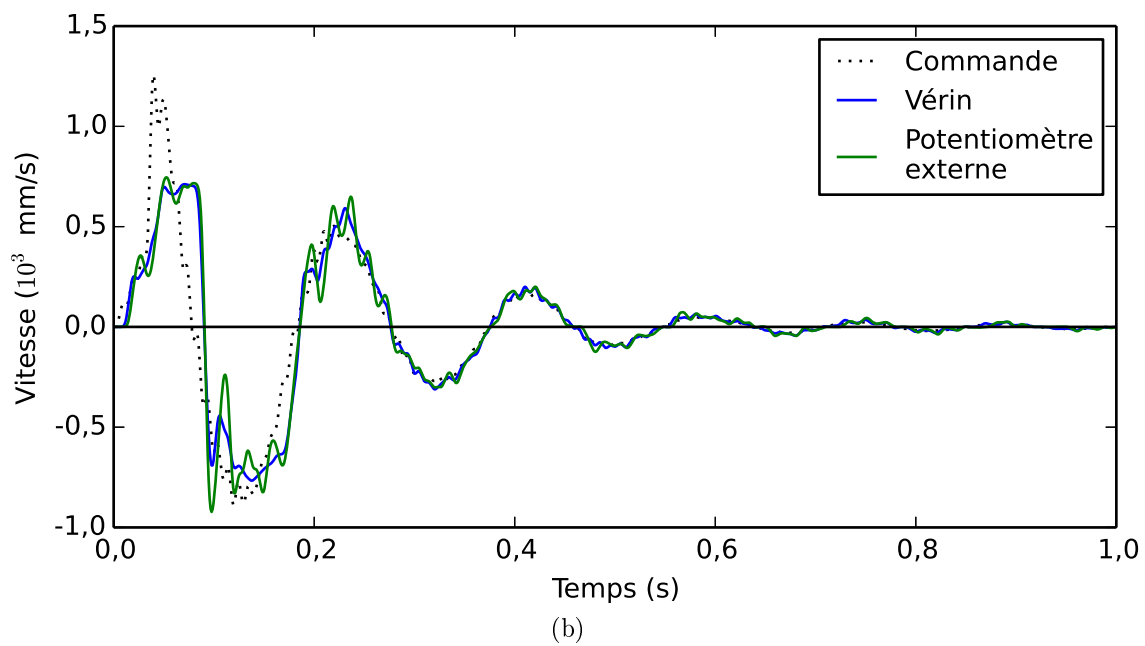
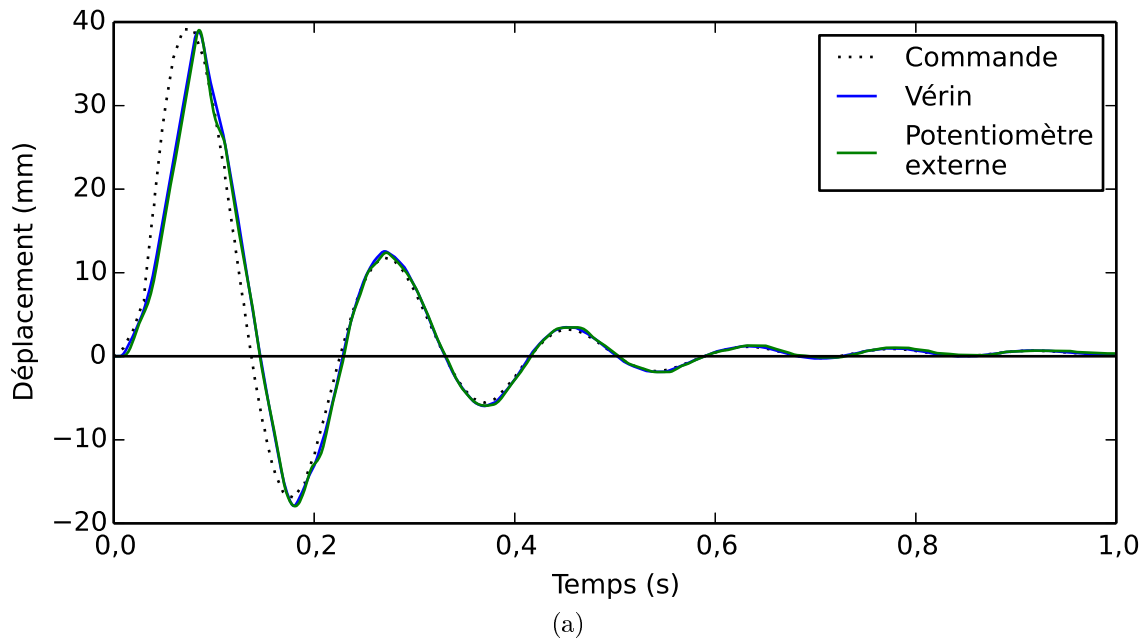


Figure 6.29 Commande vs réponse du vérin : (a) déplacement en fonction du temps, (b) vitesse en fonction du temps

6.3.4 Analyse visuelle de l'endommagement

Les figures 6.30 et 6.31 présentent des photos de la pile 2 à la fin de l'essai. Les photos sont comparées à l'endommagement final du modèle 2.2. L'essai 2 est caractérisé par une rupture en compression du béton en haut et en bas des deux poteaux. De plus, deux fissures sont présentes en bas de chaque poteau et une troisième fissure en haut de chaque poteau. La présence des ruptures en compressions sur une seule face du poteau et la présence de fissure principalement sur la face opposée à la rupture en compression montre que l'endommagement provient majoritairement de la première moitié du premier cycle. Les dommages restent locaux et l'intégrité structurale de la pile n'est pas à risque.

La figure 6.32 présente l'endommagement du modèle de béton. L'endommagement prend une valeur entre 1 et 2 où 1 est la résistance ultime du béton et 2 est la résistance résiduelle. Voir la section 5.2 pour plus de détails sur le modèle d'endommagement. Les déformations des figures sont amplifiées par un facteur de 10 pour mieux illustrer le comportement du modèle. L'endommagement du modèle est similaire à l'endommagement de la pile. Des débuts de fissures en haut et en bas de chaque poteau sont présents dans le modèle, mais non présents lors de l'essai.

Des ruptures en cisaillement des poteaux sont observables dans le modèle 2.2. Elles apparaissent lors de la deuxième moitié du premier cycle. Ces fissures sont probablement dues à l'incapacité du modèle de béton de reproduire la fermeture de fissure. Une fois le béton fissuré en tension, celui-ci est pleinement endommagé et ne peut reprendre des efforts de compressions ou de cisaillement. Ce phénomène n'est pas présent dans les modèles 1 et 2.1, car la fissuration est favorisée dans l'élément contact qui reproduit bien les caractéristiques de la fermeture d'une fissure. Pour le modèle 2.2, lorsque la fissure est favorisée dans l'élément contact, un glissement de cet élément est tout de même présent. Cette version du modèle avec la fissuration dans l'élément béton donne de meilleurs résultats. Cependant, il pourrait en être différent si l'endommagement survient pendant plusieurs cycles consécutifs.

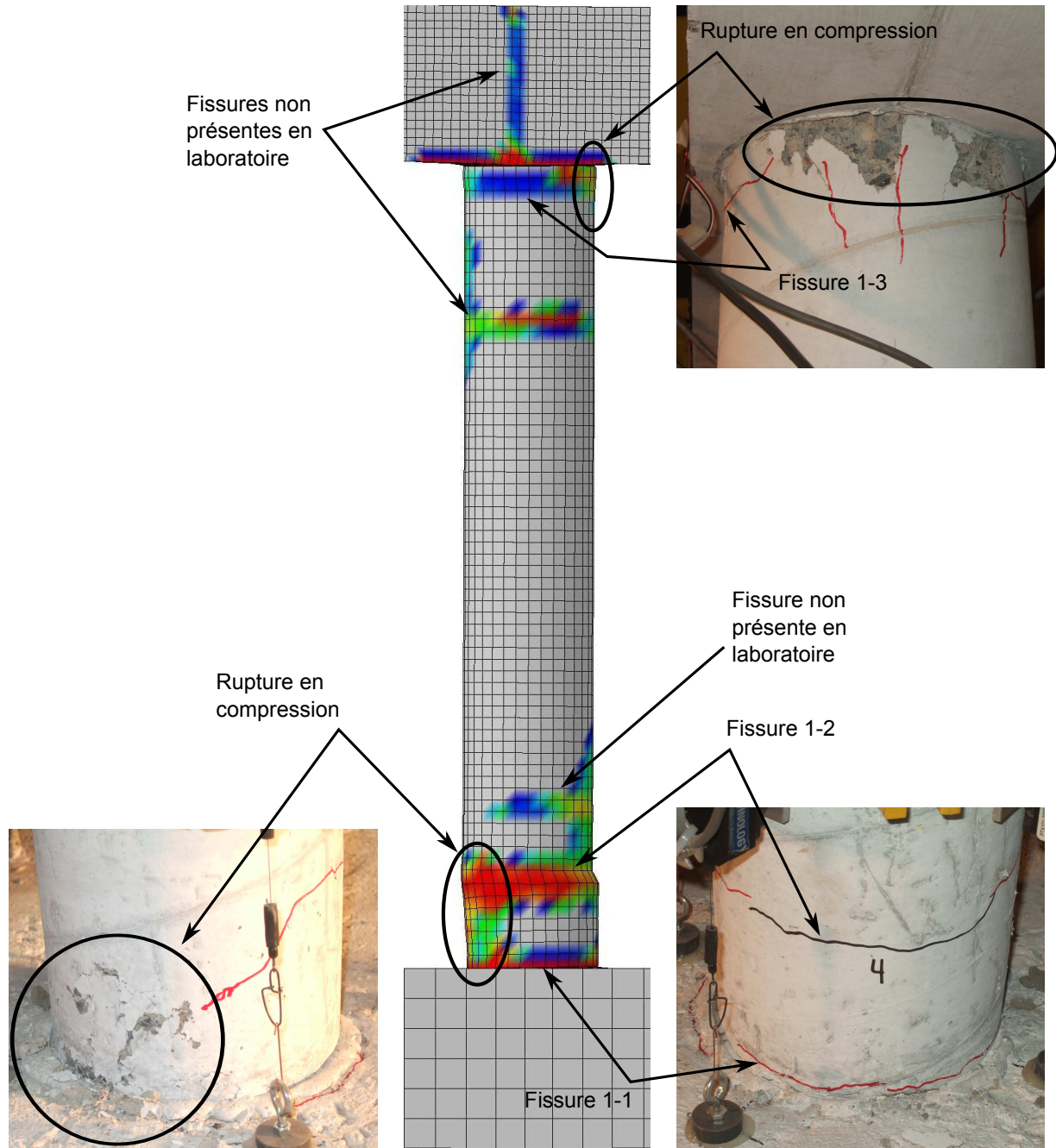


Figure 6.30 Endommagement du poteau 1 de la pile 02 suite à l'essai

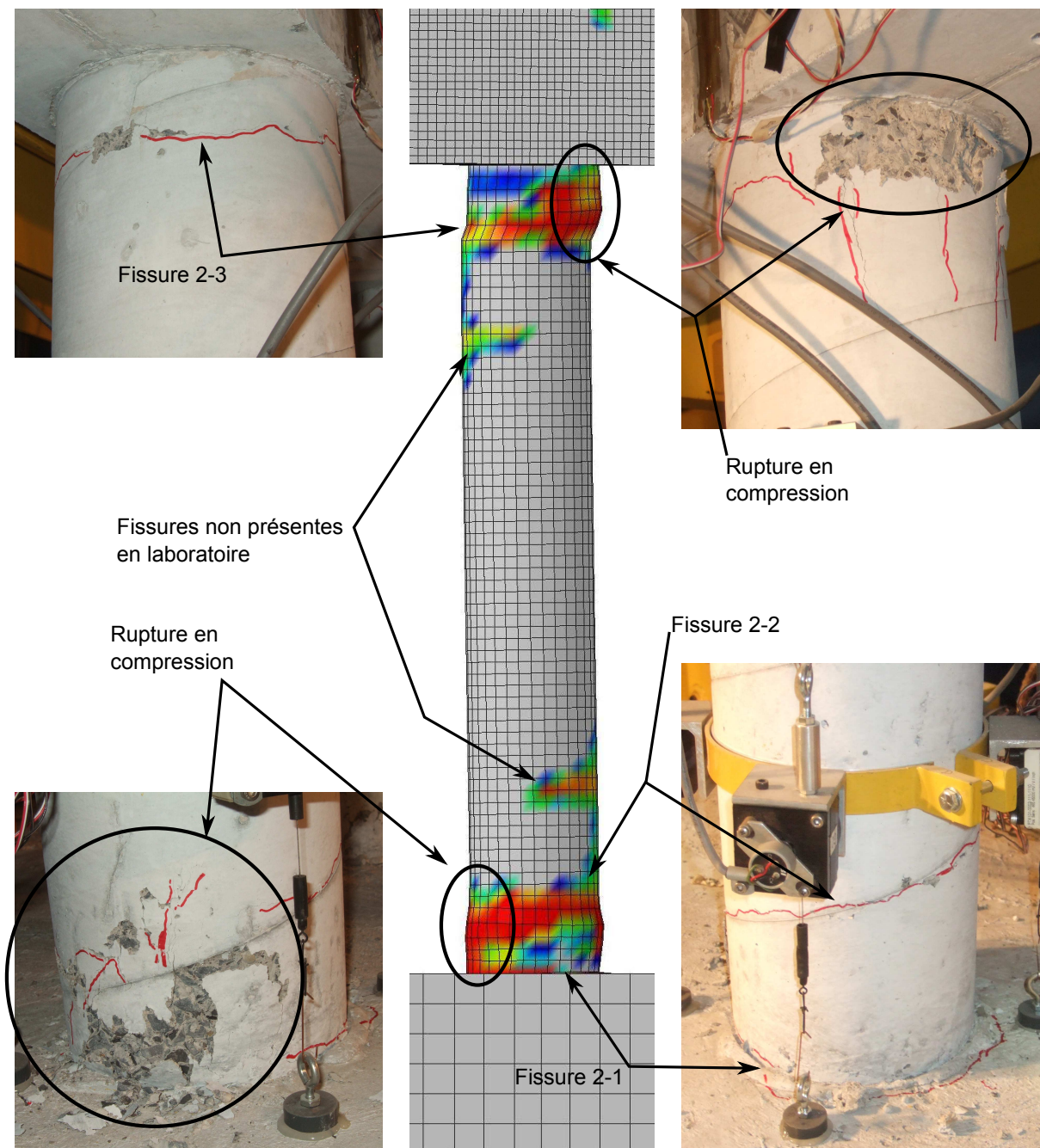
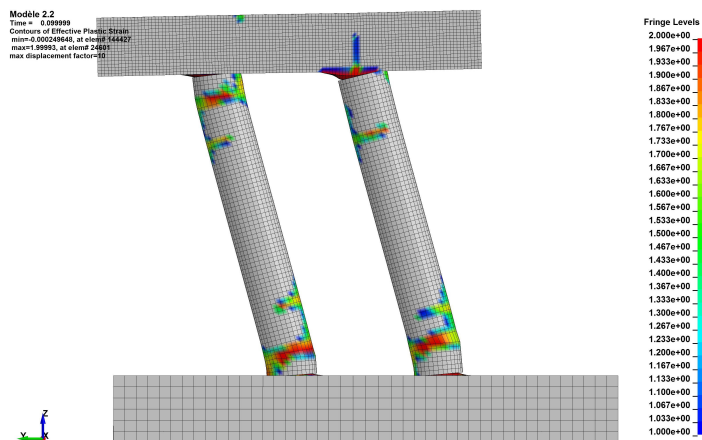
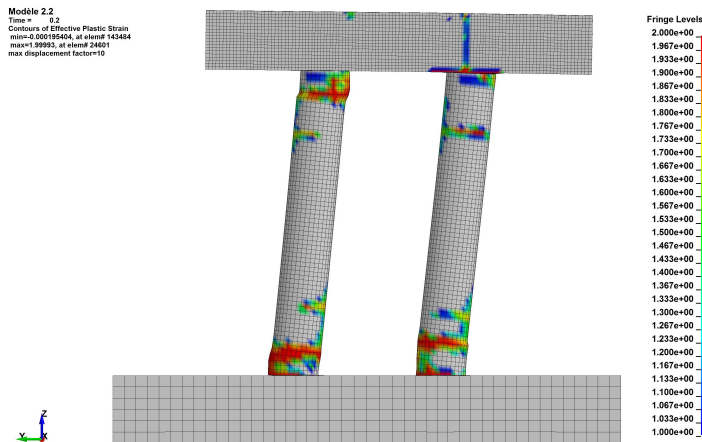


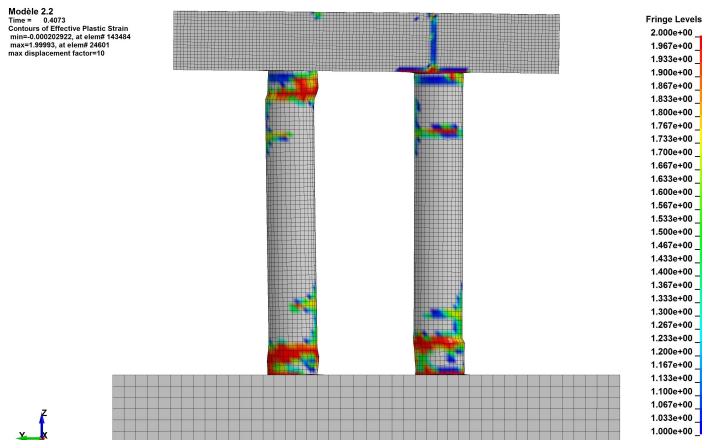
Figure 6.31 Endommagement du poteau 2 de la pile 02 suite à l'essai



(a)



(b)



(c)

Figure 6.32 Endommagement du modèle numérique 2.2 (déplacement amplifié par un facteur 10) : (a) premier déplacement positif maximum, (b) premier déplacement négatif maximum, (c) fin de l'essai

6.3.5 Résultats des jauges et potentiomètres

Précision des résultats expérimentaux des jauges et potentiomètres

Par mégarde, les résultats des jauges de déformations ont été enregistrés à l'aide d'un acquiiteur statique comportant un filtre intégré. Les données ont donc été filtrées avec un filtre Butterworth analogique passe-bas d'ordre 4 à 5 Hz. La fonction de transfert du filtre est présentée à la figure 6.33. On observe à la fréquence de l'essai de 5,48 Hz que le contenu fréquentiel du signal est atténué de 4,91 dB. Il est possible de récupérer une partie du contenu fréquentiel en amplifiant les données. Pour ce faire, les données sont initialement filtrées avec un filtre Butterworth passe-bas d'ordre 5 à 10 Hz pour éviter d'amplifier des données parasites. Par la suite, les résultats sont transformés dans le domaine fréquentiel à l'aide d'une transformation de Fourier. Le contenu fréquentiel est amplifié par la fonction de transfert inverse présentée à la figure 6.33. Une transformation de Fourier inverse est effectuée pour rapporter les données dans le domaine temporel. Finalement, les premières valeurs sont supprimées, car les résultats ont été altérés dans le processus et une valeur initiale de zéro est imposée.

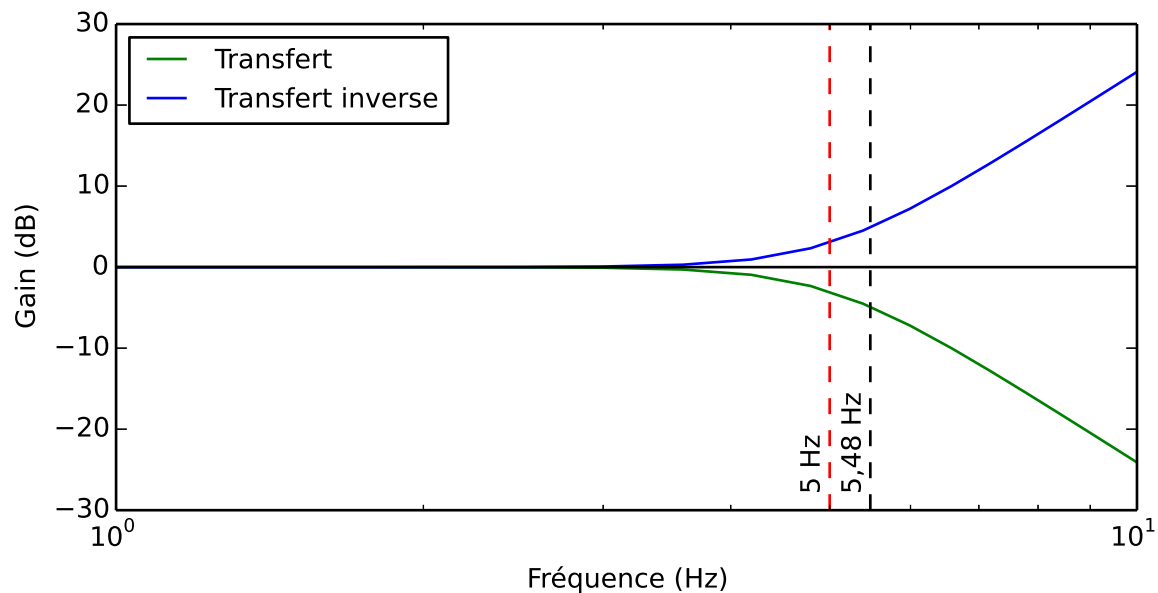


Figure 6.33 Fonction de transfert et transfert inverse du filtre de l'acquisiteur

Trois signaux ayant été enregistrés à la fois par l'acquisiteur et par le contrôleur sont utilisés pour valider les résultats. Les trois signaux sont le potentiomètre du chevêtre, le potentiomètre interne du vérin hydraulique et la cellule de charge du vérin. Les résultats présentés à la figure 6.34 démontrent qu'il est possible de retrouver une partie du contenu fréquentiel perdu et ainsi obtenir le signal original avec une précision acceptable. On

peut aussi observer que les résultats sont déphasés. Ce phénomène est causé par le filtre Butterworth, mais n'est pas problématique, car tous les signaux sont filtrés avec le même filtre. Ils ont donc le même déphasage les uns par rapport aux autres.

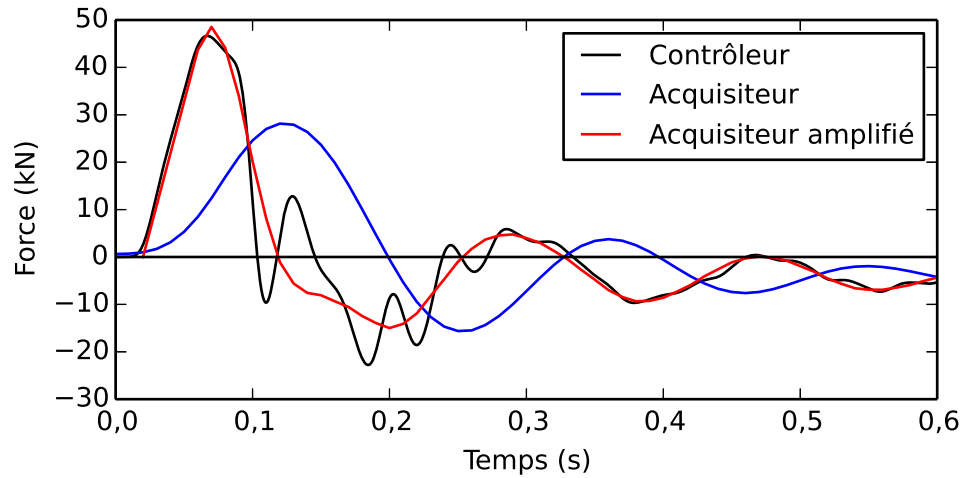
Précision des résultats numériques des jauges

LS-DYNA enregistre la force dans les éléments barres tandis que l'acquisiteur enregistre la déformation des jauges. Comme la relation force-déformation est dépendante du taux de déformation du matériau, il est complexe de transformer la force en déformation ou vice versa. Pour déterminer la déformation des jauges avec le modèle LS-DYNA, le déplacement des noeuds des éléments barres est analysé. Cette méthode peut entraîner une faible précision lorsque les noeuds ont beaucoup de déplacement et que la déformation des éléments est faible.

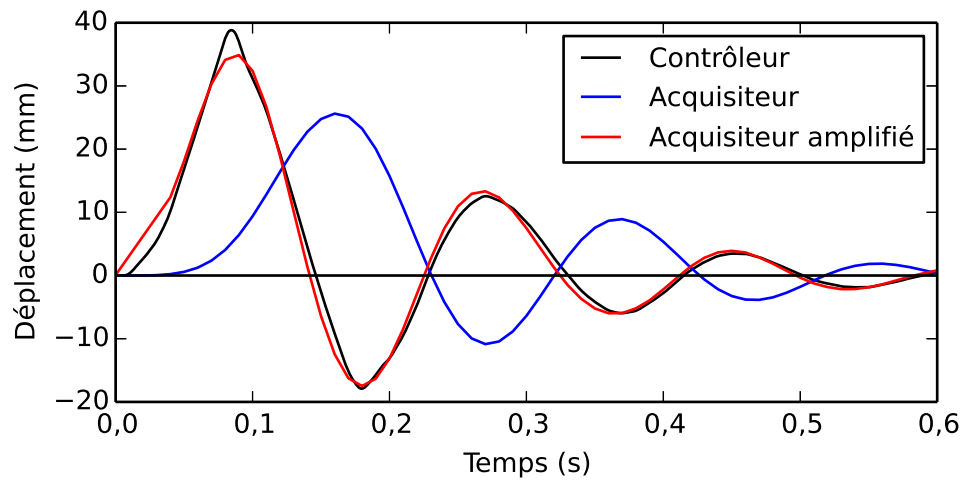
Les résultats des noeuds extraits par le logiciel incluent le déplacement du noeud avec une précision de 5 chiffres significatifs. Le tableau 6.1 présente la précision des résultats numériques des jauges. Par exemple, les noeuds de la jauge 26, situés sur une barre d'armature longitudinale du chevêtre, possèdent un déplacement de l'ordre de $10,000 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$. Le déplacement relatif entre deux noeuds a donc une précision de $\pm 0,001 \text{ mm}$ pour un élément de $11,4 \text{ mm}$ de long. La précision sur la déformation est donc de $\pm 88 \mu\text{def}$. La figure 6.35 présente les résultats en laboratoire et numériques de cette jauge. On y observe que les résultats de LS-DYNA sont imprécis, mais qu'une fois les données filtrées, la courbe est lissée et laisse paraître des résultats valables. Les résultats des jauges provenant du modèle numérique doivent être interprétés avec prudence.

Tableau 6.1 Précision des jauges du modèle LS-DYNA

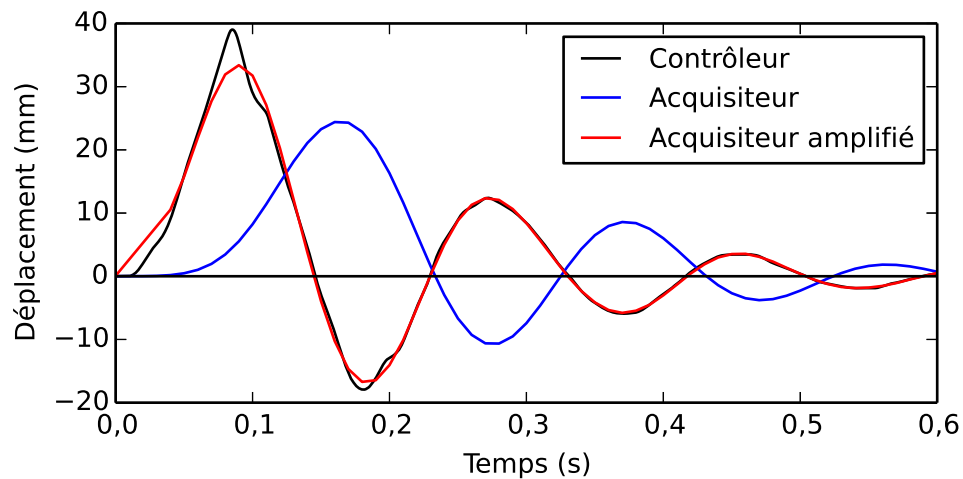
		Ordre de grandeur (mm)	Précision du déplacement (mm)	Longueur de l'élément (mm)	Précision (μdef)
Armature du chevêtre		10^1	$\pm 0,001$	11,4	± 88
Armature de confinement	haut	10^1	$\pm 0,001$	11,2	± 89
	bas	10^0	$\pm 0,0001$	11,2	± 9
Armature longitudinale	haut	10^1	$\pm 0,001$	15,0	± 67
	bas	10^0	$\pm 0,0001$	15,0	± 7
Béton	Vertical	10^1	$\pm 0,001$	45,0	± 22
	45°	10^1	$\pm 0,001$	43,2	± 23
	Horizontal	10^1	$\pm 0,001$	53,5	± 19



(a)



(b)



(c)

Figure 6.34 Validation de l'amplification des résultats de l'acquisiteur : (a) force du vérin, (b) déplacement du vérin, (c) déplacement du potentiomètre du chevêtre

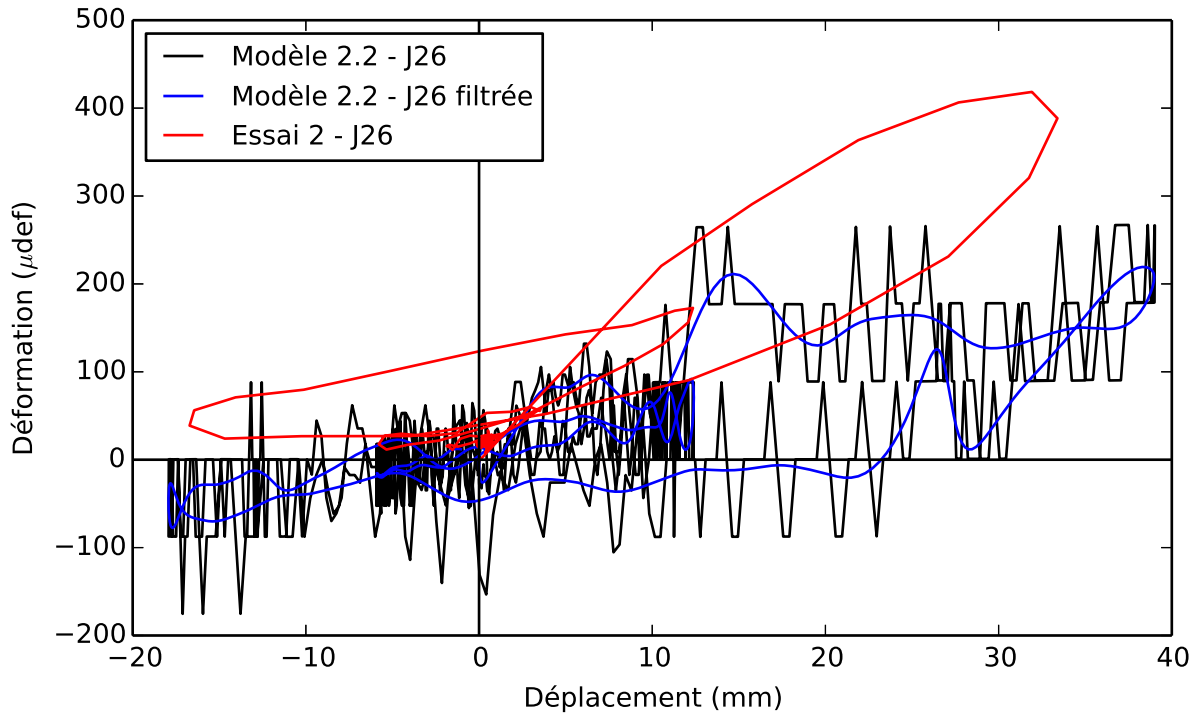


Figure 6.35 Précision de la jauge 26 dans le modèle LS-DYNA

Résultats des jauges sur les armatures

Des jauges de déformations ont été installées sur des barres d'armature pour suivre les efforts dans la structure pendant l'essai. L'emplacement de ces jauges est identifié à la figure 4.6. Les graphiques des résultats expérimentaux et numériques des jauges situés sur les armatures longitudinales sont présentés ci-dessous. Les résultats de toutes les jauges sont disponibles à l'annexe C.2.1. La limite élastique de $2805 \mu\text{def}$ est illustrée selon les propriétés quasi-statiques de l'acier définies à la section 4.4.3.

Les jauges 11 à 13, situées sur les barres de confinement dans le bas du poteau 1, et les jauges 21 à 23, situées sur les barres de confinement dans le haut du poteau 2, donnent de faibles déformations variant entre $-307 \mu\text{def}$ et $259 \mu\text{def}$. Étant donné les faibles déformations et les résultats peu précis des jauges 21 à 23, les résultats sont jugés non concluants.

La jauge 16, située sur une barre longitudinale du chevêtre près du poteau 1, a été endommagée pendant la coulée du béton, les résultats ne sont donc pas présentés. La jauge 26, située sur une barre longitudinale du chevêtre près du poteau 2, démontre peu de déformation avec un maximum de $418 \mu\text{def}$ lors de l'essai. Les efforts dans le chevêtre sont donc faibles. Cependant la charge axiale est appliquée directement sur les poteaux. Il pourrait en être différent si la charge est appliquée sur le chevêtre entre les poteaux.

Les résultats des jauges sur les armatures longitudinales des poteaux démontrent des signes de plastification de l'acier. Pour le poteau 1, la jauge 10, située dans la semelle, et la jauge 14, située dans le bas du poteau, indiquent que la barre d'armature a plastifié durant l'essai. Les résultats du modèle indiquent que la jauge 10 a peu de déformation et la jauge 14 est l'élément qui plastifie. Pour cette raison, cette jauge a beaucoup plus de déformation dans le modèle que dans l'essai. Le comportement de la jauge 14 est tout de même similaire dans l'essai et le modèle. Les résultats expérimentaux de la jauge 15, située dans le haut du poteau, indiquent qu'il n'y a pas eu de plastification avec son comportement linéaire et sa déformation maximale de $1179 \mu\text{def}$. D'un autre côté, le modèle atteint $3008 \mu\text{def}$ lors du premier déplacement négatif. Les résultats des jauges 10, 14 et 15 sont présentés aux figure 6.36, 6.37 et 6.38 respectivement.

Pour le poteau 2, la jauge 20, située dans la semelle, et la jauge 24, située dans le bas du poteau, indiquent qu'il y a eu très peu ou pas de plastification de l'armature dans le bas du poteau pendant l'essai. La jauge 24 a une déformation maximale de $2968 \mu\text{def}$ atteignant la limite élastique sans avoir de déformation plastique. La jauge 25 indique une déformation maximale de $1408 \mu\text{def}$ pendant l'essai, mais le plateau démontre un comportement plastique. Le modèle présente une déformation très supérieure à la limite plastique indiquant la plastification de l'acier au niveau de la jauge. Les résultats des jauges 20, 24 et 25 sont présentés aux figure 6.39, 6.40 et 6.41 respectivement.

Contrairement aux résultats du premier essai, la perte d'ancrage ne semble pas être problématique et les barres d'armature ont pu développer leur pleine résistance

Les essais d'impact sont caractérisés par des vitesses de chargement élevées. Ceci peut engendrer des taux de déformation largement au-dessus de limite quasi-statique. Ceci peut engendrer une augmentation de la résistance de l'acier non négligeable. La figure 6.42 présente le taux de déformation en fonction du temps des jauges des armatures longitudinales des poteaux 1 et 2. On observe que le taux de déformation en absolu atteint 10^{-1} et 10^0 dans l'essai et le modèle respectivement. Les taux de déformation sont majoritairement au-dessus de la limite quasi-statique et l'augmentation de la résistance moyenne de l'acier par rapport à la résistance statique (f_y/f_{ys}) des armatures les plus sollicitées est de 1,080 selon le modèle de Cowper Symonds. Selon le même modèle, le taux de déformation quasi-statique mesuré en laboratoire possède un facteur $f_{yqs}/f_{ys} = 1,042$. En comparant l'augmentation de la résistance avec la valeur mesurée en laboratoire, le facteur $f_y/f_{yqs} = 1,038$.

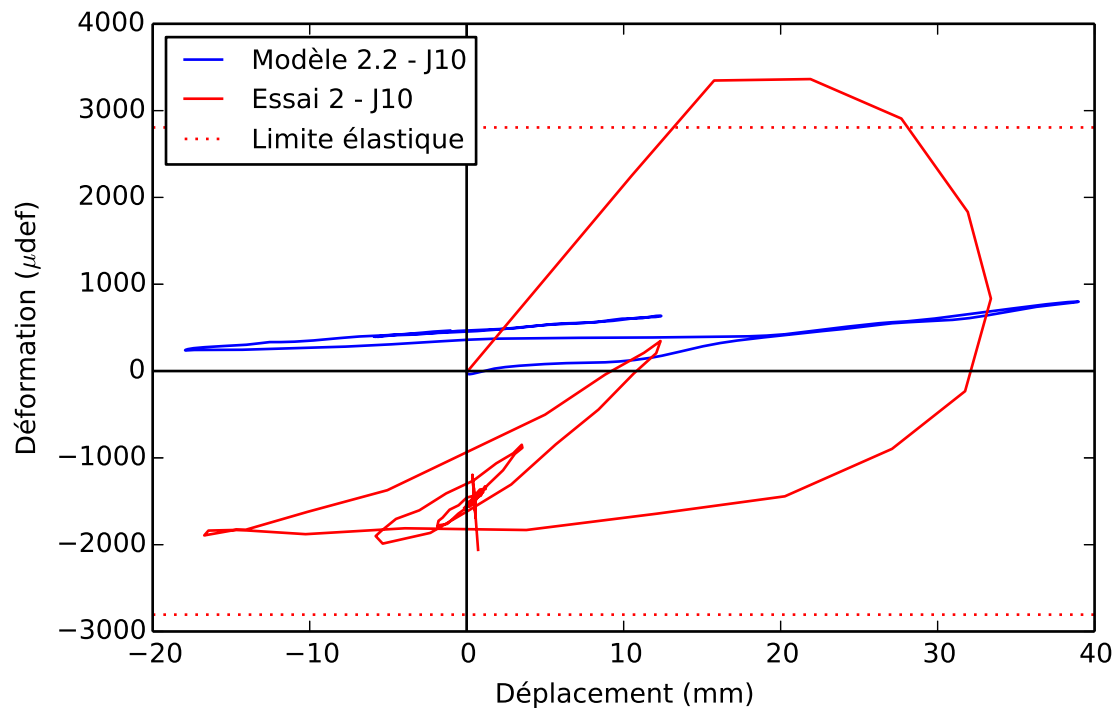


Figure 6.36 Graphique des résultats de la jauge 10 de l'essai 2

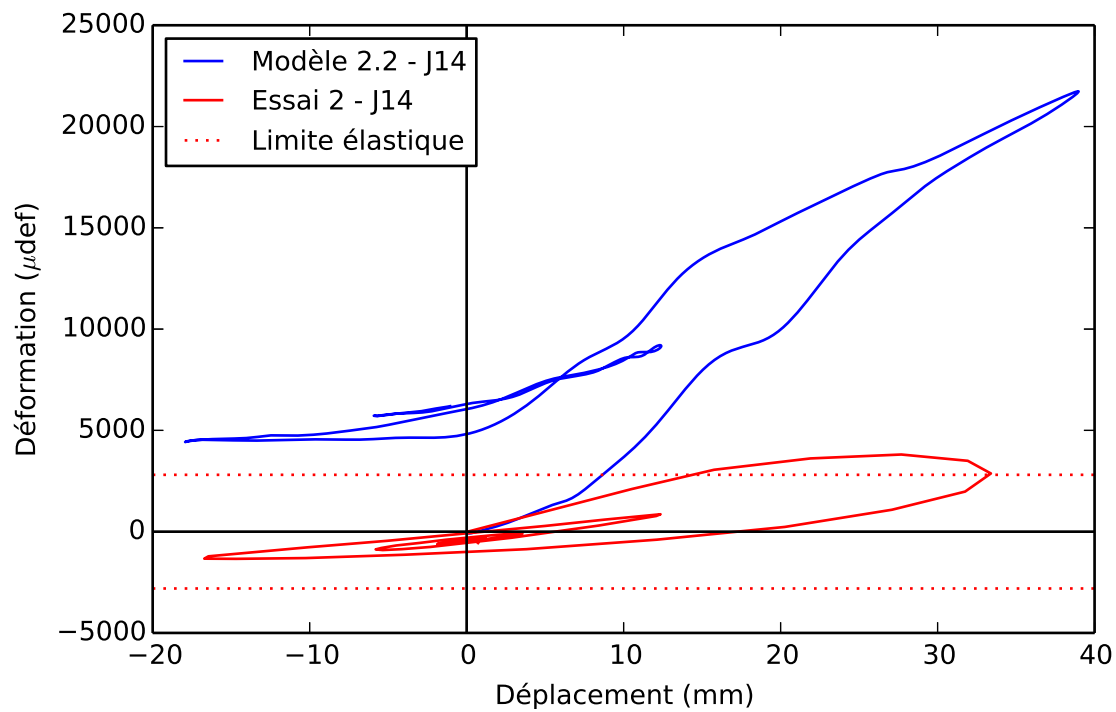


Figure 6.37 Graphique des résultats de la jauge 14 de l'essai 2

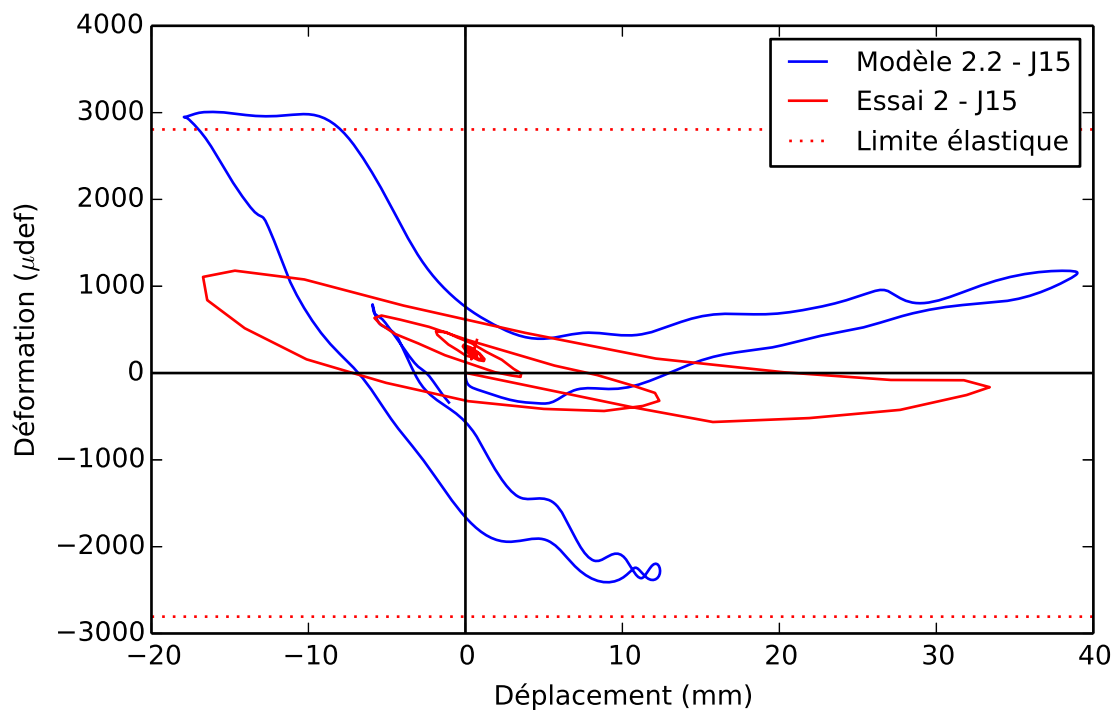


Figure 6.38 Graphique des résultats de la jauge 15 de l'essai 2

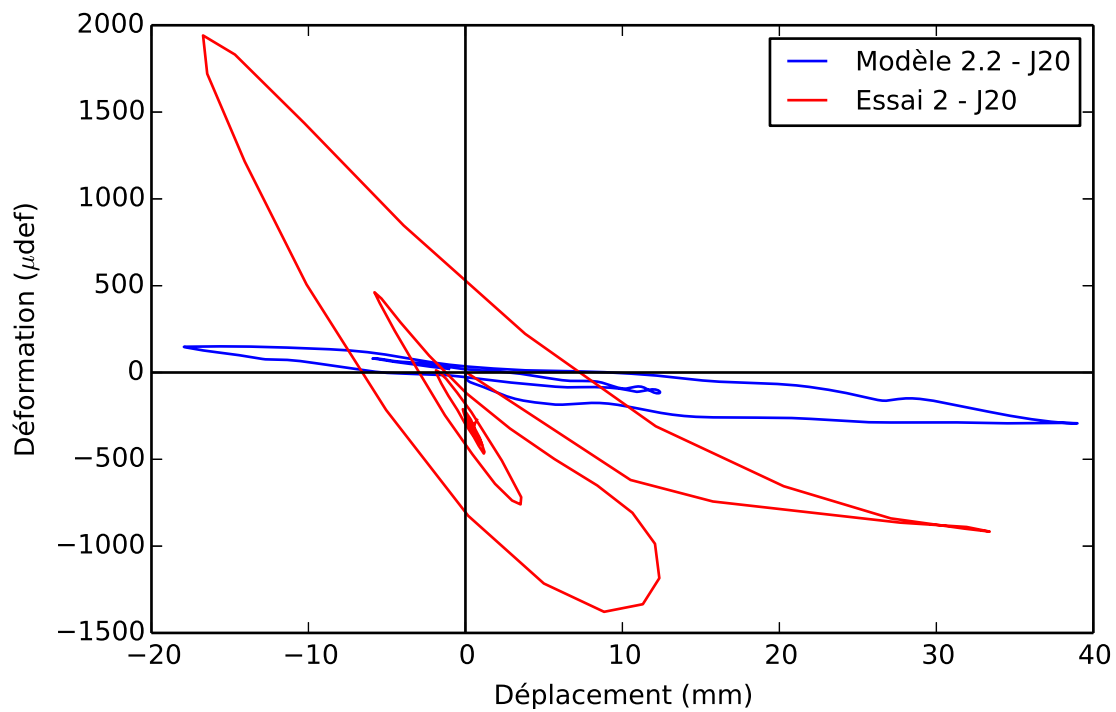
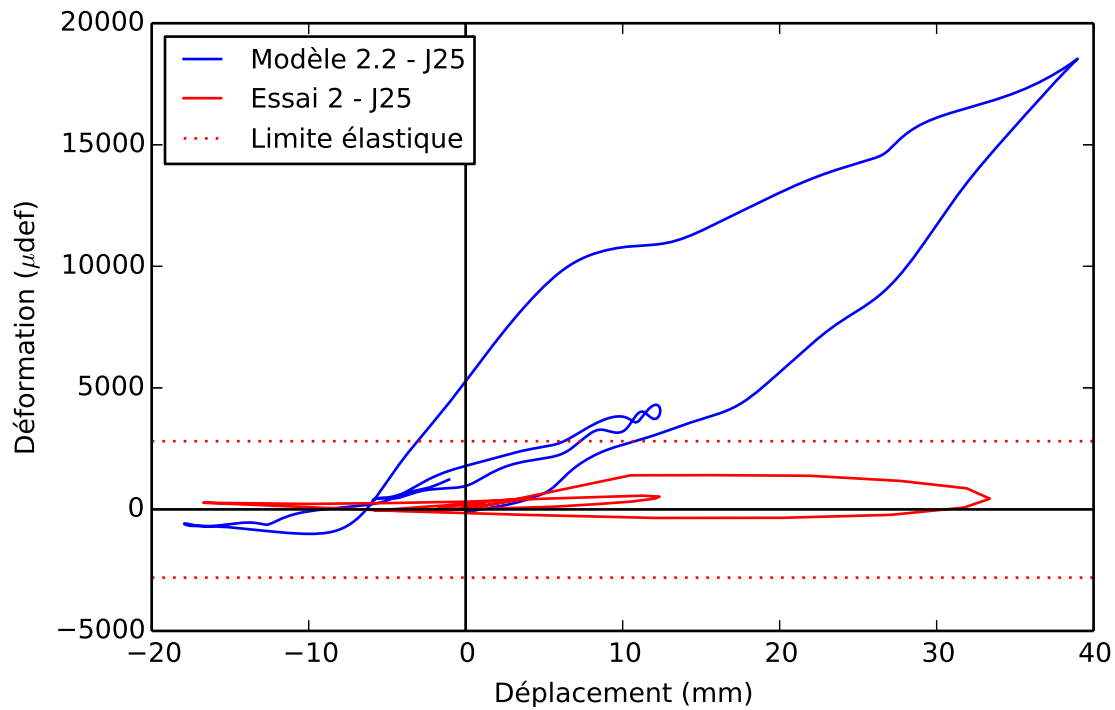
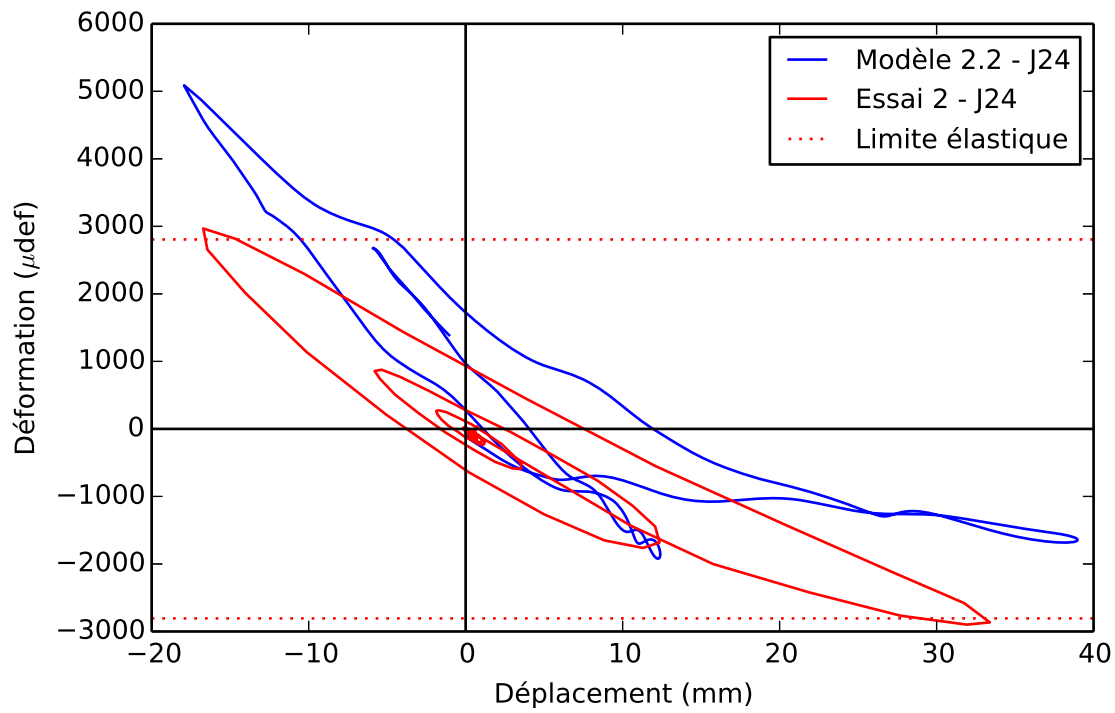


Figure 6.39 Graphique des résultats de la jauge 20 de l'essai 2



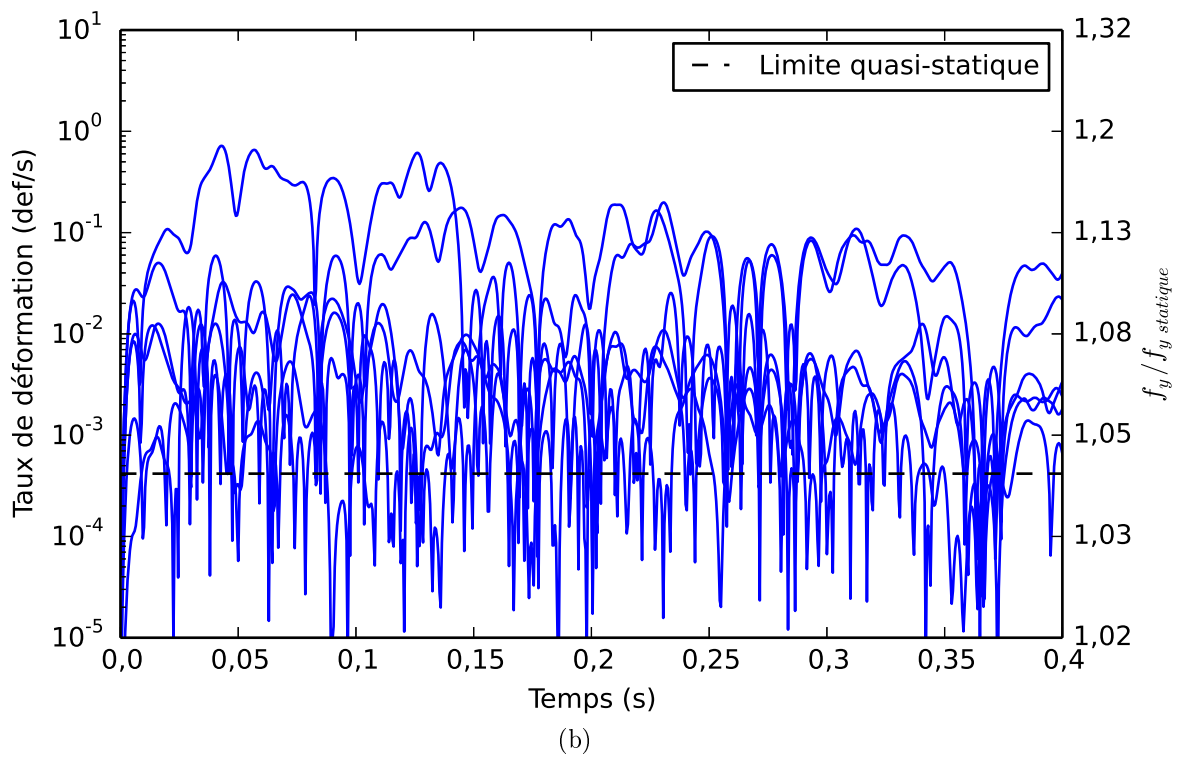
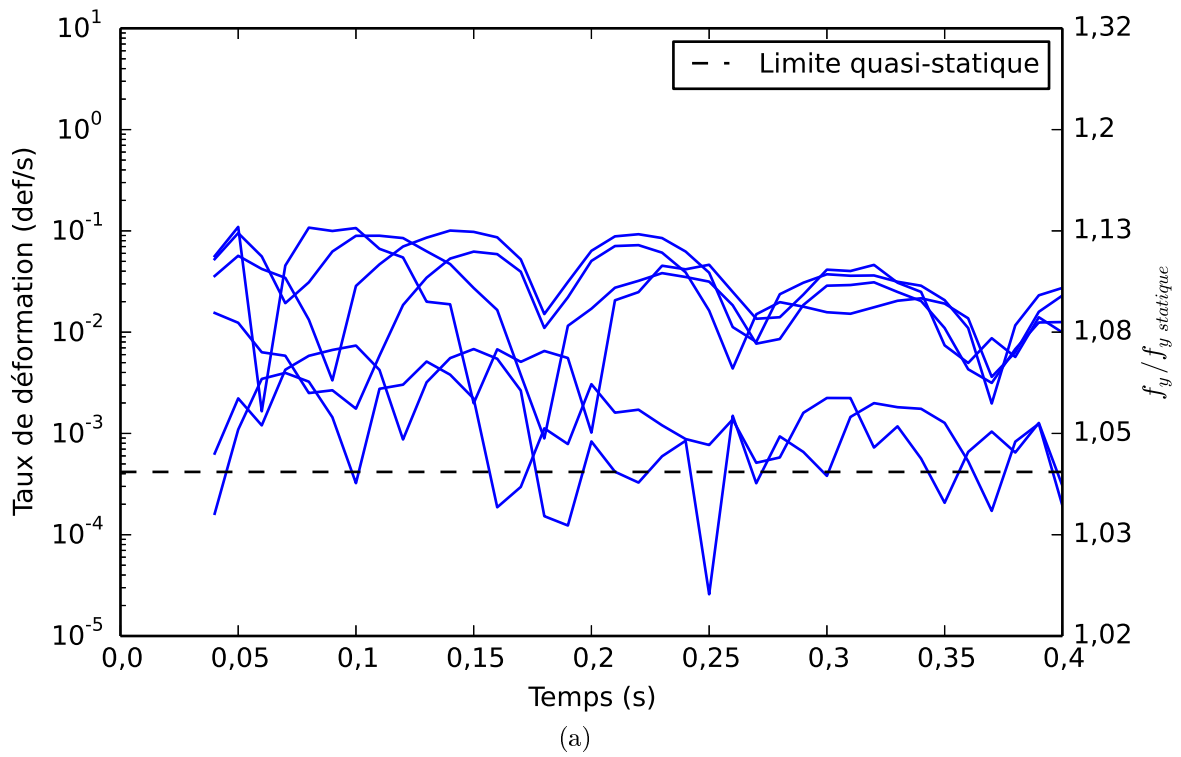


Figure 6.42 Graphique du taux de déformation des armatures : (a) essai 2, (b) modèle 2.2

En résumé, les résultats des jauges de l'armature viennent confirmer les observations faites sur l'analyse visuelle de l'endommagement. Les armatures dépassent la limite élastique pendant le premier déplacement positif. Pour le premier déplacement négatif, le spécimen présente des efforts considérables et pourrait potentiellement plastifier. Les cycles subséquents démontrent des efforts moindres. De plus, les taux de déformation observés dans les barres d'armature démontrent qu'il dépasse le taux de déformation quasi-statique. Les forces à la limite élastique sont donc légèrement plus élevées comparativement aux valeurs quasi-statiques.

Résultats des jauges en rosette sur le béton

Deux rosettes sont installées sur le chevêtre vis-à-vis les poteaux. Chaque rosette possède 3 jauges de déformation à béton : une verticale (17 et 27), une horizontale (18 et 28) et une à 45° (19 et 29). Ces rosettes permettent de mesurer les efforts dans le béton. Les jauges des rosettes sont donc soumises à des charges biaxiales. Même si la sensibilité des jauges aux efforts transversaux est faible, les résultats des jauges sont corrigés. Pour ce faire, les équations ci-dessous sont utilisées [Micro-Measurements, 2011] :

$$\epsilon_1 = \frac{\hat{\epsilon}_1 (1 - \nu_0 K_{t1}) - K_{t1} \hat{\epsilon}_3 (1 - \nu_0 K_{t3})}{1 - K_{t1} K_{t3}} \quad (6.3)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\hat{\epsilon}_2 (1 - \nu_0 K_{t2})}{1 - K_{t2}} - \frac{K_{t2} [\hat{\epsilon}_1 (1 - \nu_0 K_{t1}) (1 - K_{t3}) + \hat{\epsilon}_3 (1 - \nu_0 K_{t3}) (1 - K_{t1})]}{(1 - K_{t1} K_{t3}) (1 - K_{t2})} \quad (6.4)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\hat{\epsilon}_3 (1 - \nu_0 K_{t3}) - K_{t3} \hat{\epsilon}_1 (1 - \nu_0 K_{t1})}{1 - K_{t1} K_{t3}} \quad (6.5)$$

où ϵ_i et $\hat{\epsilon}_i$ sont respectivement les résultats des jauges corrigés et non corrigés, K_{ti} sont les sensibilités transversales des jauges et $\nu_0 = 0,285$ est le coefficient de poisson des jauges. Si $K_{t1} = K_{t2} = K_{t3}$, les formules peuvent être simplifiées, mais pour la jauge 17, $K_t = -1,2\%$ et pour les jauges 18, 19, 27 à 29, $K_t = -1,1\%$.

Les résultats des jauges de l'essai 2 et du modèle 2.2 sont présentés à l'annexe C.2.2. On observe que la jauge horizontale 17 ainsi que les jauges verticales 18 et 28 subissent peu de déformation lors de l'essai. Ces mêmes jauges dans le modèle sont non-concluante due à leur précision. La jauge 27 du modèle possède une déformation maximale de 235 μdef . Les jauges 19 et 29 à 45° ont des déformations respectives de $-88 \mu\text{def}$ à $89 \mu\text{def}$ et $-109 \mu\text{def}$ à $25 \mu\text{def}$.

Les déformations dans les jauges de béton sont faibles et peu de conclusions peuvent être tirées de ces jauges considérant la précision des mesures. Il est à noter que les valeurs sont mises à zéro au début de l'essai. Les déformations dues à la charge axiale des poteaux ne sont donc pas prises en compte dans les résultats présentés. Un chevêtre avec des charges appliquées entre les poteaux pourrait donner des résultats différents.

Résultats des potentiomètres sur les poteaux

Les poteaux sont munis de 2 anneaux comportant chacun 4 potentiomètres. Un anneau est situé dans le bas et l'autre dans le haut du poteau. Les potentiomètres sont fixés à la dalle et ils servent à mesurer la rotation et le déplacement vertical des poteaux. L'emplacement des potentiomètres est illustré à la figure 4.15. Les résultats de la rotation et du déplacement vertical des poteaux sont présentés aux figures 6.43 à 6.46 et 6.47 à 6.50 respectivement. Sur ces graphiques, on observe que le modèle représente bien la rotation des poteaux. Cependant le déplacement vertical diffère légèrement après le premier cycle positif. Ceci est dû à l'endommagement du modèle qui est excessif et qui ne représente pas bien la fermeture des fissures.

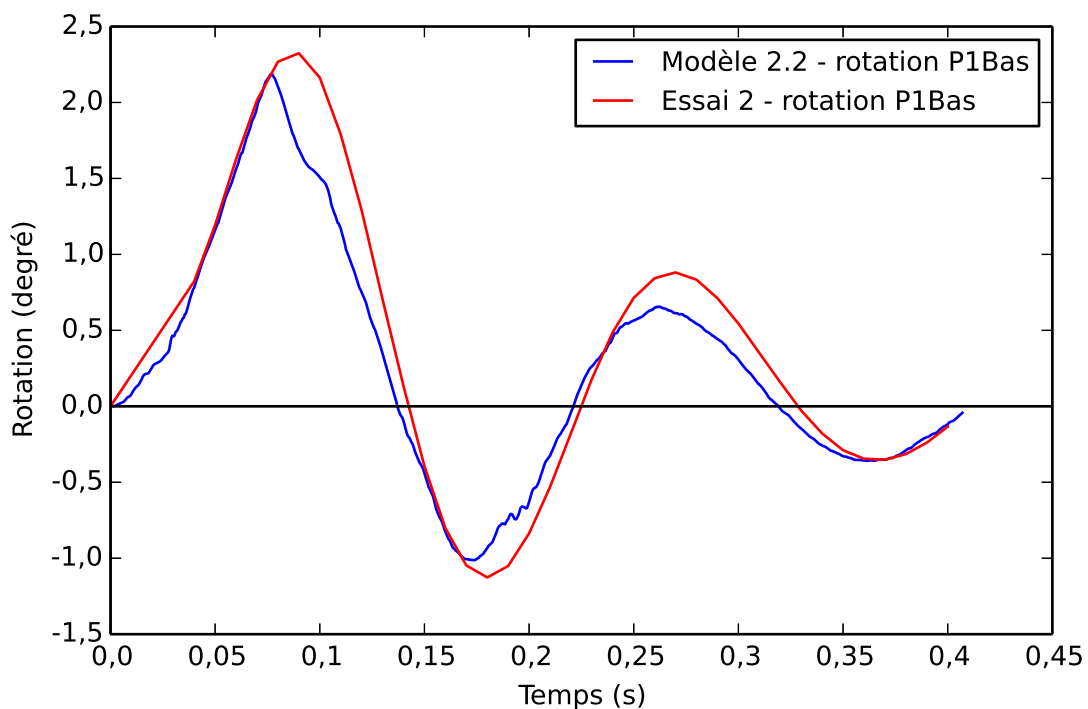


Figure 6.43 Graphique de la rotation du poteau 1 bas de l'essai 2

6.3.6 Graphiques du déplacement vertical des poteaux

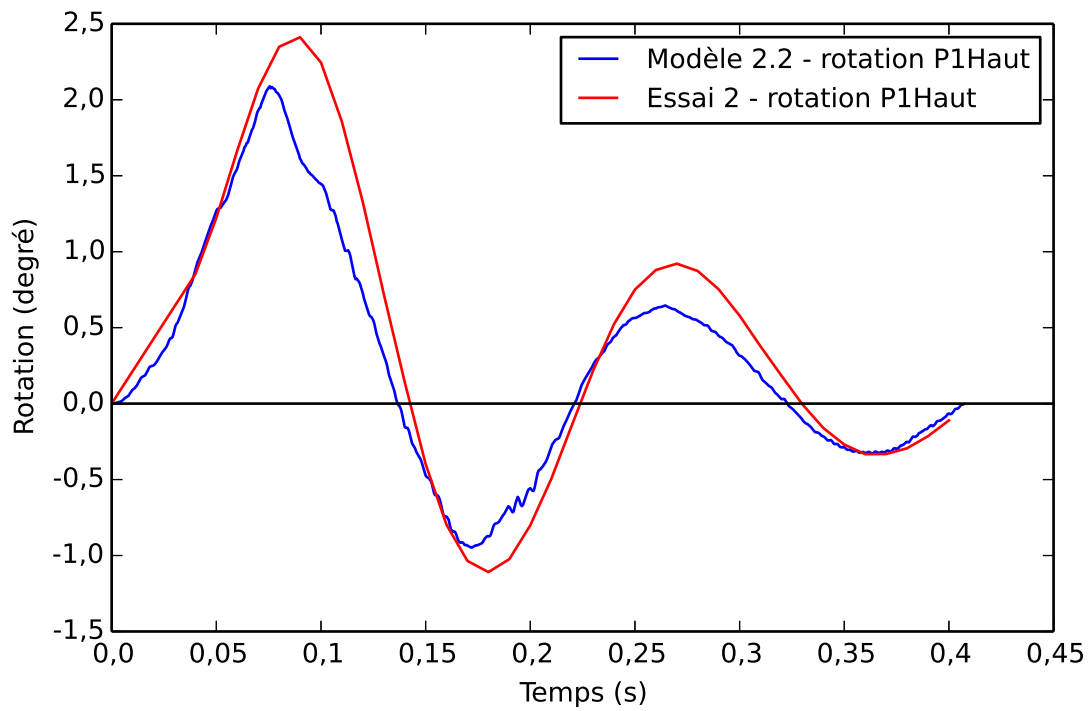


Figure 6.44 Graphique de la rotation du poteau 1 haut de l'essai 2

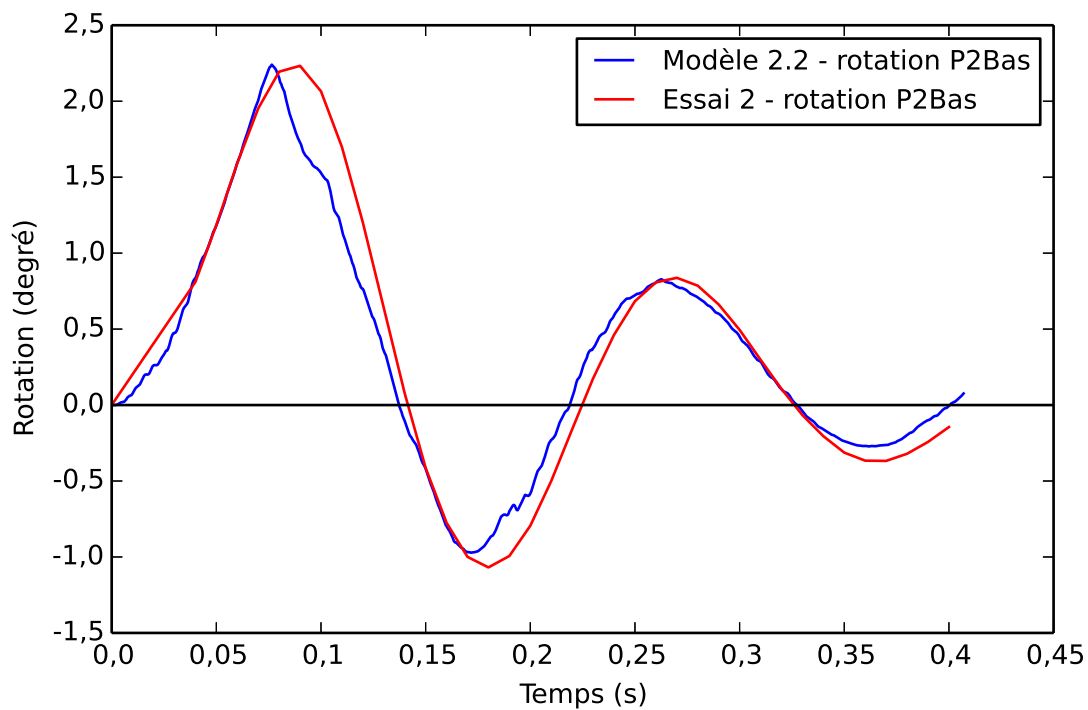


Figure 6.45 Graphique de la rotation du poteau 2 bas de l'essai 2

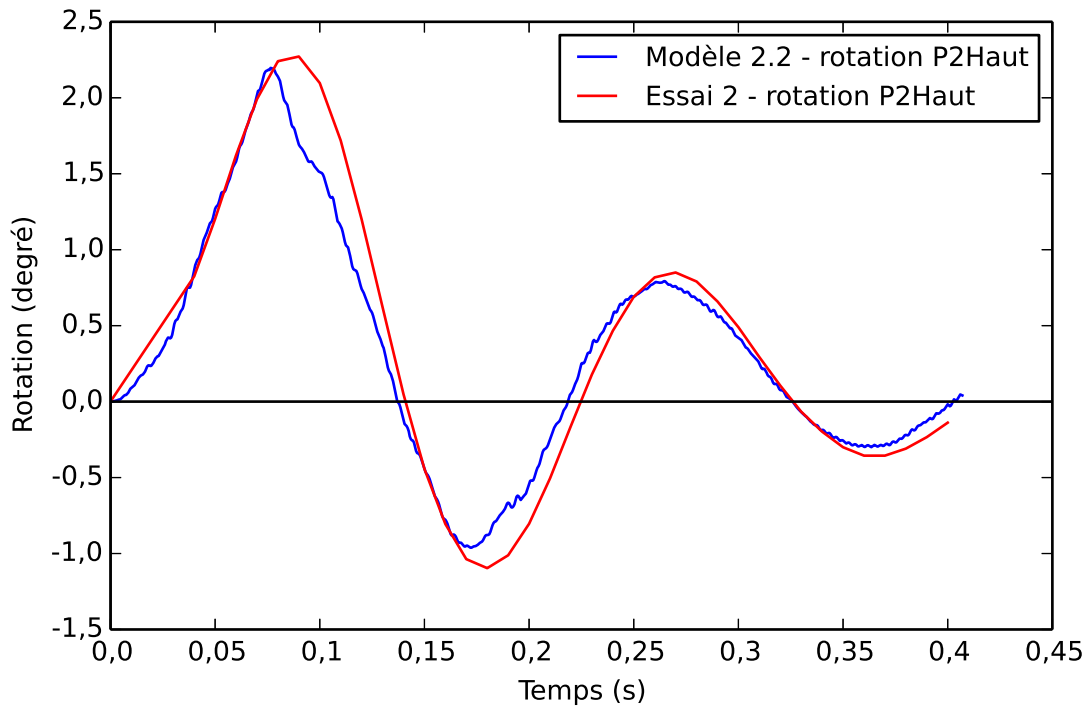


Figure 6.46 Graphique de la rotation du poteau 2 haut de l'essai 2

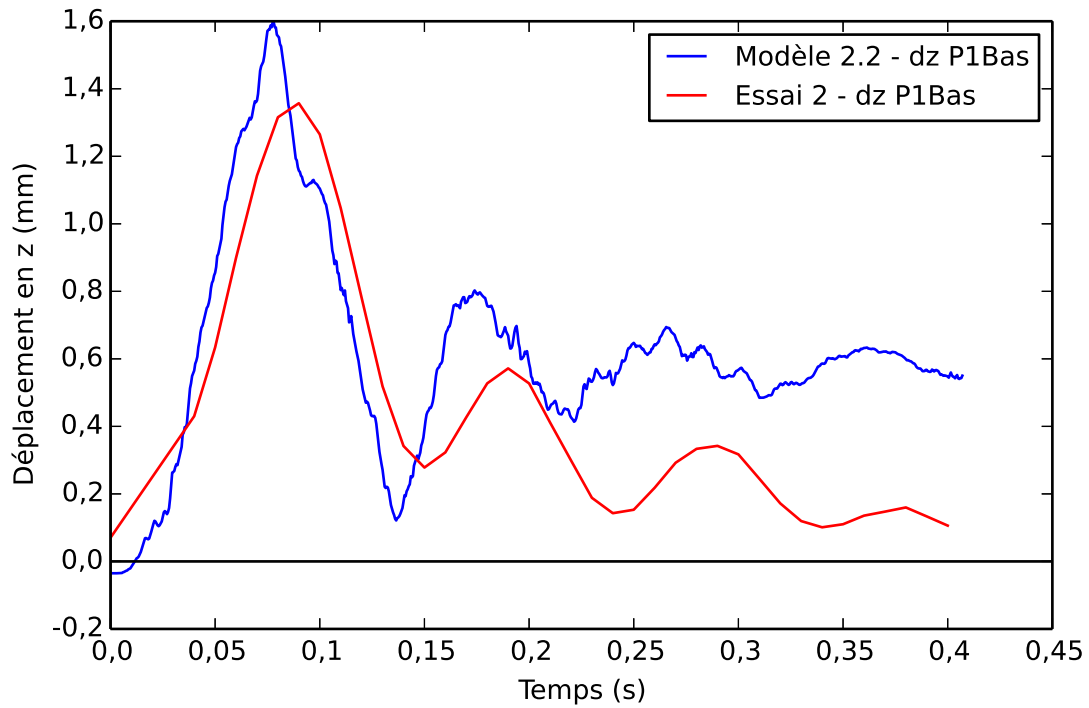


Figure 6.47 Graphique du déplacement vertical du poteau 1 bas de l'essai 2

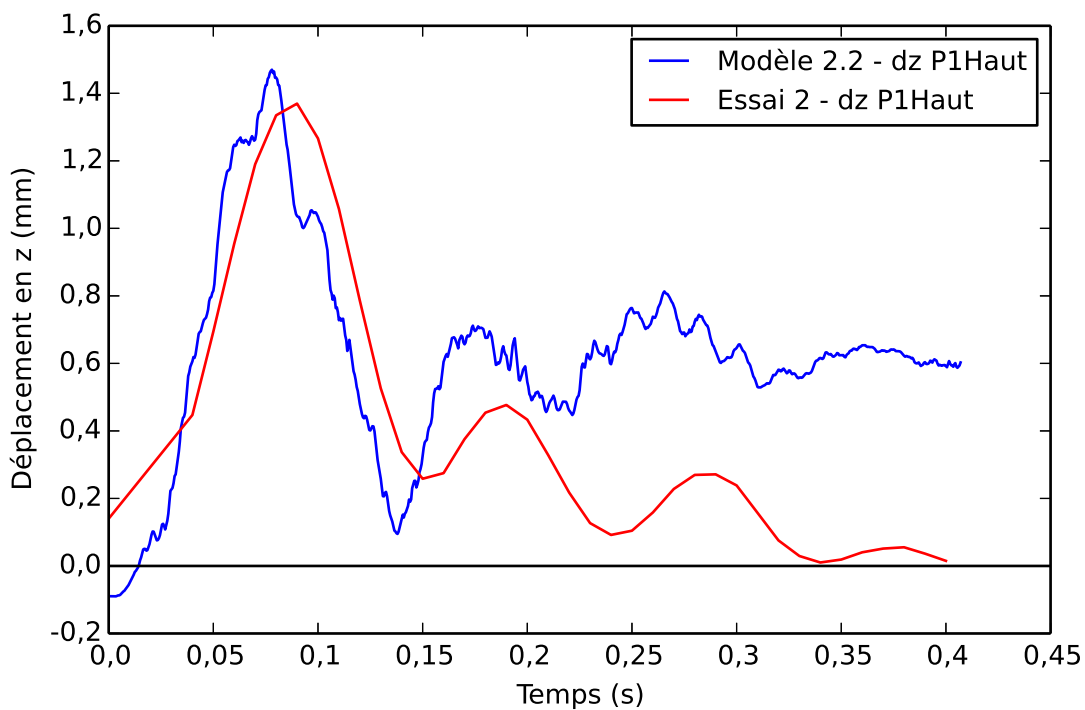


Figure 6.48 Graphique du déplacement vertical du poteau 1 haut de l'essai 2

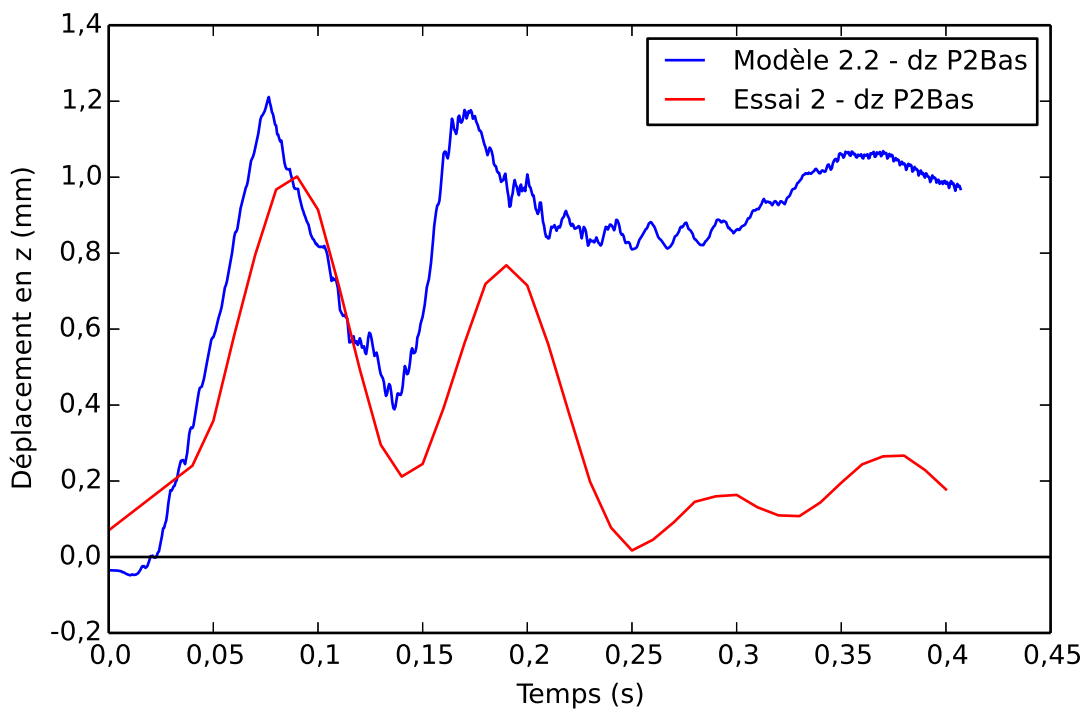


Figure 6.49 Graphique du déplacement vertical du poteau 2 bas de l'essai 2

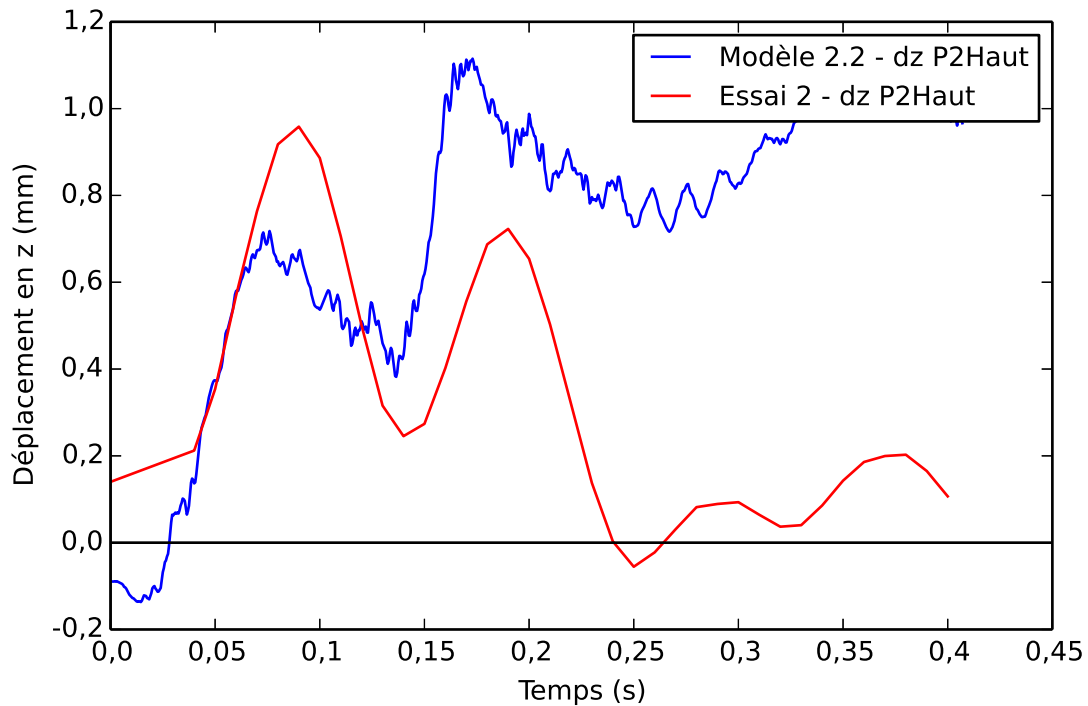


Figure 6.50 Graphique du déplacement vertical du poteau 2 haut de l'essai 2

6.3.7 Résistance de la pile 2 et du modèle 2.2

Force en fonction du temps

La force imposée par le vérin correspond à la force dynamique externe. Elle constitue donc la somme de la force due à la rigidité, à l'amortissement et à l'inertie. Il est important que la force mesurée dans le modèle numérique représente les conditions en laboratoire. La force externe du modèle 2.2 est mesurée dans l'élément contact liant la plaque du vérin à la structure de chargement. De cette manière, la force d'inertie inclut la masse participante de la structure du chevêtre, de la structure de la charge axiale et de la pile. Voir la section 5.4.4 pour plus de détails sur le modèle. La figure 6.51 (a) compare la force externe de la pile en fonction du temps de l'essai 2 et du modèle 2.2.

Pour calculer la force pseudo-statique, la force d'inertie $f_I = m_{\text{eff}}a(t)$ est soustraite à la force totale. La masse effective est mesurée en laboratoire, voir section 6.3.2. L'accélération du chevêtre correspond à la double dérivée du déplacement du chevêtre en fonction du temps.

La force pseudo-statique du modèle est déterminée en additionnant la force de cisaillement dans les deux éléments contacts liant les poteaux à la semelle. Comme la semelle à un

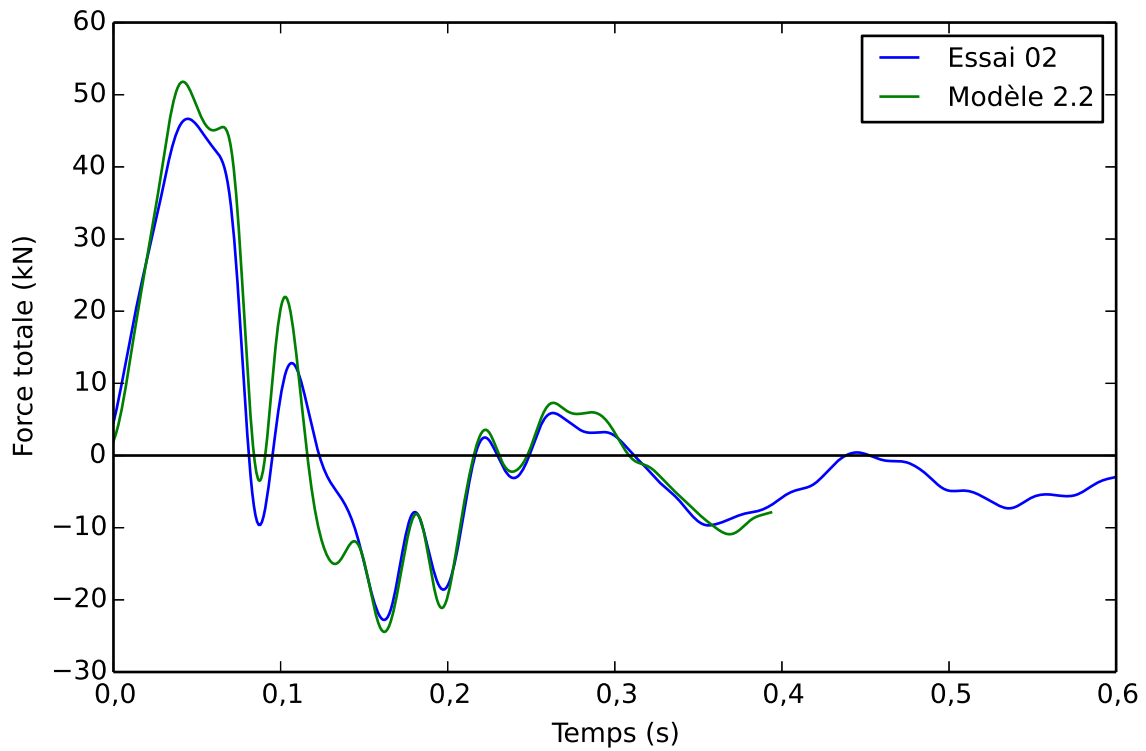
déplacement négligeable et que son accélération est nulle, elle ne contribue pas à la masse effective. La force transmise aux fondations est donc la force du vérin moins la force d'inertie.

La figure 6.51 (b) compare la force pseudo-statique de l'essai 2 et du modèle 2.2 en fonction du temps. Contrairement à l'essai 1, les matériaux se déforment à des taux de déformation beaucoup plus élevés que la limite quasi-statique. La force pseudo-statique inclut donc cette augmentation de la résistance de la pile.

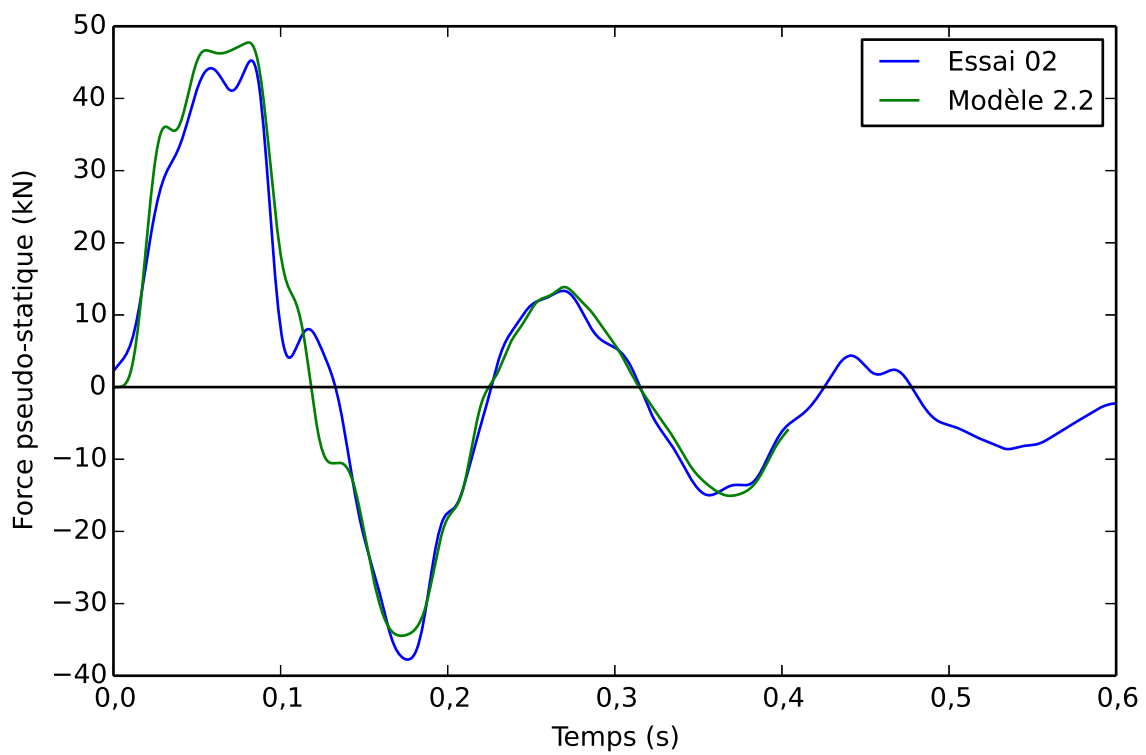
Courbes d'hystérésis

Les forces dynamiques et pseudo-statiques présentées ci-dessus peuvent être tracées en fonction du déplacement du chevêtre. Ceci permet d'obtenir les courbes d'hystérésis dynamiques et pseudo-statiques. Elles sont présentées à la figure 6.52. On remarque que le modèle 2.2 représente bien le comportement de l'essai en laboratoire. Le modèle numérique est légèrement plus résistant que les résultats en laboratoire, mais la force de la courbe d'hystérésis est similaire. L'ouverture de la courbe et le déplacement résiduel dans les derniers cycles sont très similaires dans le modèle numérique et dans l'essai en laboratoire. Ceci démontre que la rigidité de la pile, son comportement plastique et l'énergie dissipée du modèle reproduisent bien les résultats expérimentaux.

Il est possible d'idéaliser la courbe expérimentale pseudo-statique par une courbe bilinéaire. Elle est présentée dans la figure 6.52(b) et elle est caractérisée par un déplacement et une force à la limite élastique de 3,95 mm et 29,2 kN respectivement. La rigidité élastique est de 7392 kN/m et la rigidité plastique est de 610 kN/m. Pour un déplacement maximal de 39 mm, on obtient une force quasi-statique maximale de 50,9 kN à l'échelle 1 dans 6. Selon les facteurs de Cauchy présentés au tableau 4.1, on obtient une force de 1832 kN à l'échelle 1 dans 1. En considérant que la charge d'impact avait été initialement limitée à 90 % de la charge d'impact d'un camion (voir section 4.4.5), la force quasi-statique de l'impact d'un camion est donc supérieure à 1832 kN. Cette charge est plus élevée que la charge d'impact d'un camion selon la norme CSA-S6-06 et CSA-S6-14 de 1400 kN et légèrement supérieur que la norme AASHTO de 1800 kN.

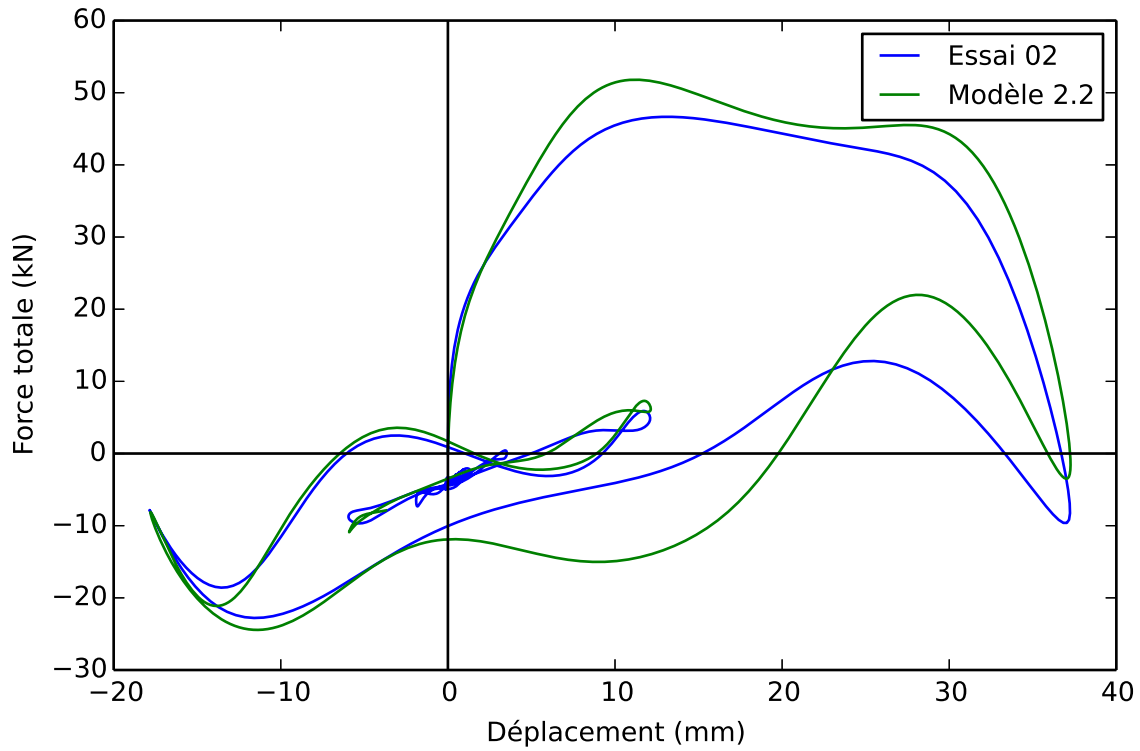


(a)

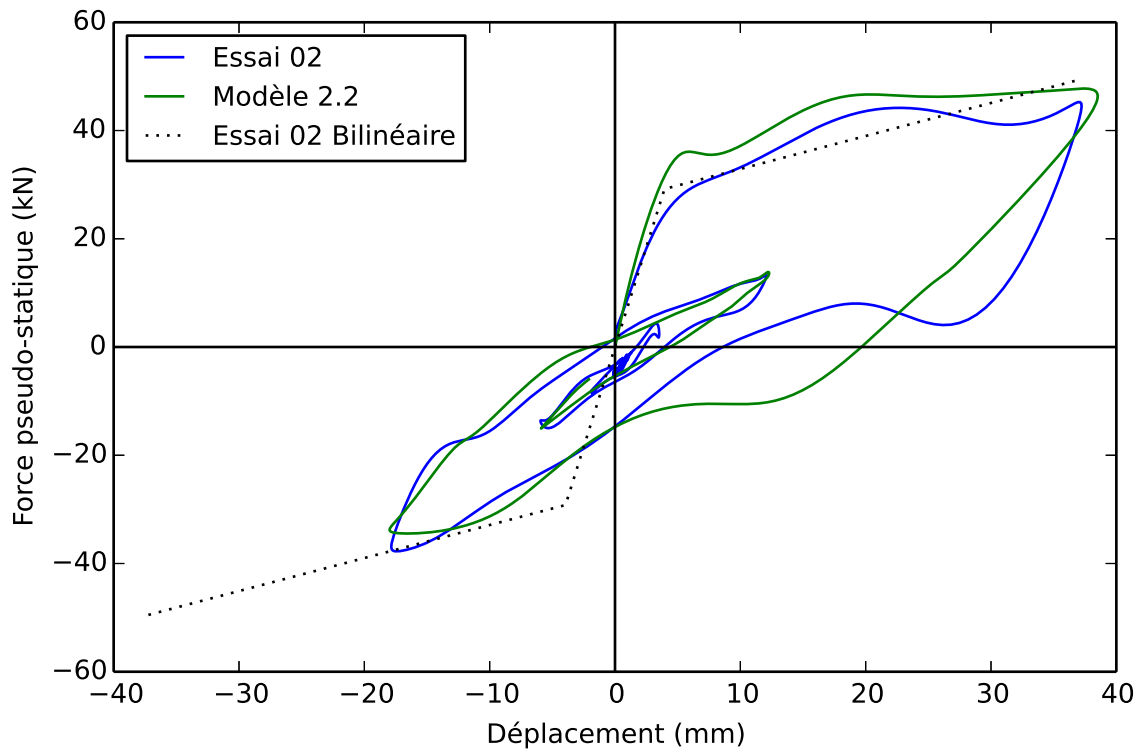


(b)

Figure 6.51 Graphique de la force en fonction du temps : (a) force totale en fonction du temps, (b) force pseudo-statique en fonction du temps



(a)



(b)

Figure 6.52 Courbes d'hystérésis de l'essai 2 et du modèle 2.2 : (a) courbe dynamique, (b) courbe pseudo-statique

En évaluant l'énergie dissipée par la pile, il est possible d'analyser quelle est la contribution de chaque cycle à la dissipation d'énergie. La figure 6.53 présente l'énergie dans la pile en fonction du temps. L'énergie totale est l'intégrale de la courbe force du vérin en fonction du temps et l'énergie interne est l'énergie totale moins l'énergie cinétique. L'énergie totale restant à la fin de l'essai est l'énergie dissipée par la pile. Lors de l'essai, la pile a dissipé 1499 joules. Le tableau 6.2 présente les valeurs de l'énergie dissipée pour les deux premiers cycles. Ces valeurs correspondent à l'énergie interne lorsque le déplacement du chevêtre est nul. On remarque que la majorité de l'énergie est dissipée dans le premier cycle.

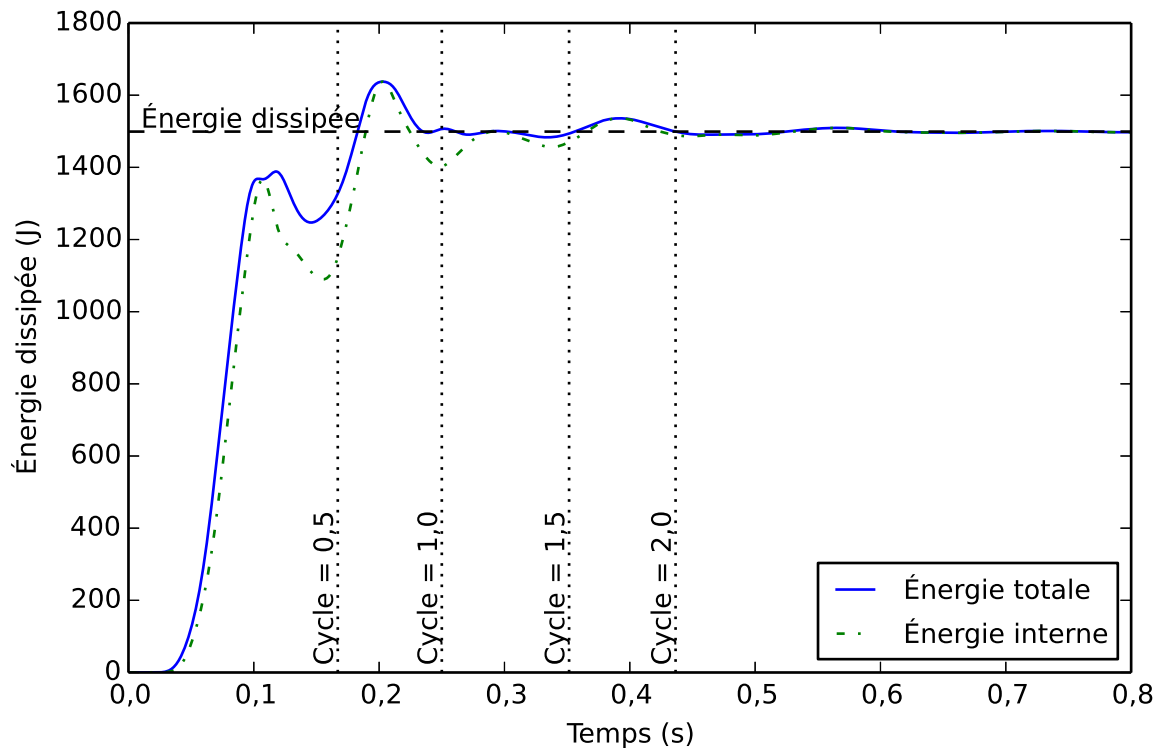


Figure 6.53 Graphique de l'énergie dissipée lors de l'essai 2

Tableau 6.2 Énergie dissipée lors de l'essai

cycle	temps (s)	Énergie totale (J)	Énergie dissipée (J)	Énergie dissipée (% E dissipée totale)
0,5	0,167	1327	1150	76,7
1,0	0,250	1507	1403	93,6
1,5	0,352	1494	1470	98,1
2,0	0,437	1499	1489	99,4

6.3.8 Conclusion sur l'essai 2

Pour conclure, il a été possible de reproduire avec succès une charge d'impact sur un modèle réduit 1 dans 6 d'une pile de pont dans les laboratoires de l'Université de Sherbrooke. De plus, le modèle numérique LS-DYNA est capable de bien reproduire l'endommagement, la force et le comportement global de l'essai. Le modèle de béton présente une certaine faiblesse au niveau de l'ouverture et de la fermeture des fissures. Comme la majorité des déformations et de l'endommagement survient lors du premier cycle, ceci n'est pas problématique. Finalement, la force pseudo-statique de l'essai est supérieur à 1832 kN alors que la norme CSA-S6-06 et CSA-S6-14 évalue cette charge à 1400 kN.

6.4 Comparaison de l'hystérésis des essais 1 et 2

Les résultats des courbes d'hystérésis des essais 1 et 2 diffèrent. L'essai quasi-statique se compare aux analyses statiques généralement utilisées dans la pratique ainsi que la méthode d'analyse demandée par les normes CSA-S6-06 et CSA-S6-14 alors que l'essai dynamique représente le comportement réel du spécimen suite à un impact. Dans le but de comparer les différences dues au type de chargement imposé, les différences dues aux propriétés des matériaux et la géométrie de l'essai doivent être évaluées. Les principaux facteurs pouvant influencer les résultats sont énumérés ci-dessous :

1. variation de la résistance de l'acier et du béton ;
2. ajout d'une charge axiale sur les poteaux pour l'essai 2 ;
3. variation de la distance centre à centre des poteaux de la pile ;

Les effets de ces trois items sont évalués pour ajuster les résultats de la pile 01. Les facteurs négligés dans cette analyse sont la variation géométrique de la pile et de l'emplacement des armatures dus aux tolérances de fabrication ainsi que la perte d'ancrage des armatures des poteaux de la pile 01.

Pour comparer les résultats des deux essais, des méthodes analytiques simples sont utilisées. Premièrement, un modèle simplifié d'un portique constitué de trois éléments poutres est utilisé pour déterminer la variation des efforts due à la géométrie de la pile. Le logiciel Langage d'analyse des structures (LAS) [Lapointe *et al.*, 2009] est utilisé pour trouver les efforts dus à une charge unitaire de 1 kN. Le tableau 6.3 présente les propriétés utilisées dans les modèles LAS. Ceux-ci sont déterminés à l'aide des propriétés statiques des matériaux et de la géométrie présentées au chapitre 4. L'inertie effective des poteaux est évaluée

selon un ratio α_c de l'inertie non fissuré. L'article 21.2.5.2 de la norme CSA A23.3-04 et CSA A23.3-14 suggère l'équation :

$$\alpha_c = 0,5 + 0,6 \frac{P_s}{f'_c A_g} \leq 1,0 \quad (6.6)$$

où $P_s/f'_c A_g$ est le ratio de la charge axiale en service sur la résistance en compression. Pour la pile 01, il n'y a pas de charge axiale initiale donc $P_s/f'_c A_g = 0$ et $\alpha_c = 0,5$. Pour la pile 02, $P_s/f'_c A_g = 0,1$ et $\alpha_c = 0,56$. Finalement, l'inertie non fissurée du chevêtre est utilisée, car aucune fissure n'était présente à la fin des essais. Il est à noter que les variations dans les propriétés mécaniques des matériaux ont un effet négligeable sur l'inertie des poteaux.

Tableau 6.3 Propriétés des modèles LAS

Modèle	LAS 01	LAS 02
Hauteur (m)	1,120	1,120
Largeur (m)	0,540	0,500
Aire poteau (m ²)	0,0226	0,0226
Inertie non fissurée poteau (m ⁴)	37,7E-6	37,7E-6
Inertie effective poteau (m ⁴)	18,9E-6	21,1E-6
Aire chevêtre (m ²)	0,0424	0,0424
Inertie effective chevêtre (m ⁴)	142,1E-6	142,1E-6
Module d'élasticité (kPa)	26,9E6	26,3E6

Les figures 6.54 et 6.55 présentent respectivement les résultats des diagrammes des efforts axiaux unitaires (Nu) et des moments fléchissant unitaires (Mu) des deux modèles pour une charge unitaire appliquée sur le chevêtre de 1 kN. Il est donc possible de poser les équations suivantes :

$$N(F) = NuF + P_0 \quad (6.7)$$

$$M(F) = MuF \quad (6.8)$$

où $N(F)$ et $M(F)$ sont respectivement la charge axiale et le moment dans les poteaux en fonction de la force appliquée sur le chevêtre F et P_0 la charge initiale dans les poteaux. La charge axiale pour la pile 01 est nulle et pour la pile 02, $P_0 = -73,6$ kN. La charge unitaire engendre un déplacement du chevêtre de 0,1226 mm et 0,1135 mm pour les modèles de la pile 01 et de la pile 02 respectivement. Par hypothèse, la limite élastique de la pile est définie par l'apparition de la première rotule sur le poteau donc dans le bas des poteaux.

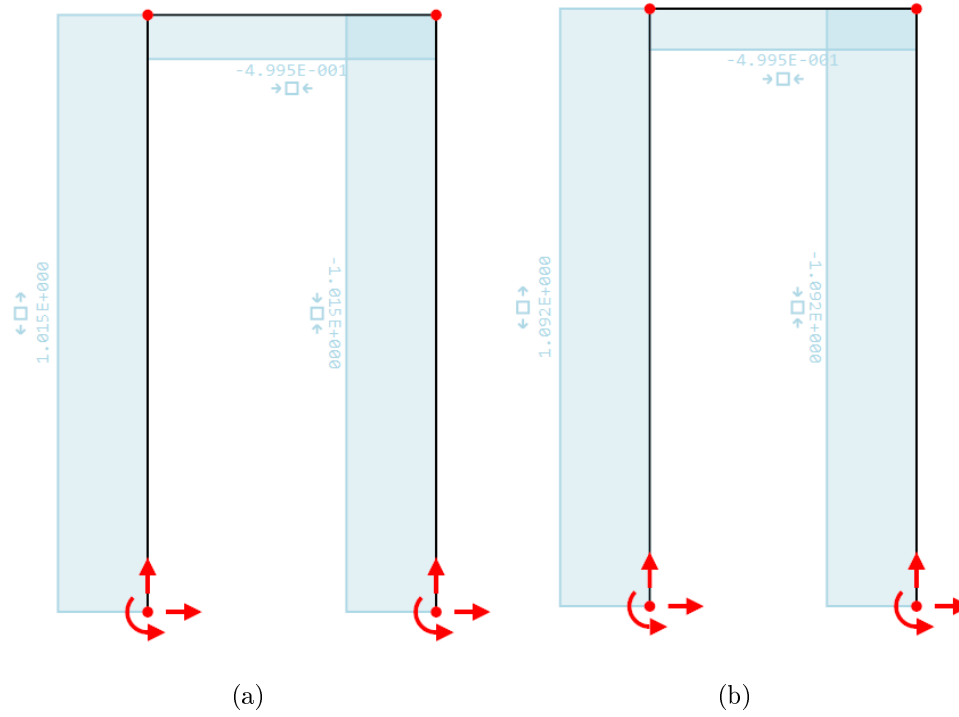


Figure 6.54 Diagrammes des efforts axiaux (kN) : (a) pile 01, (b) pile 02

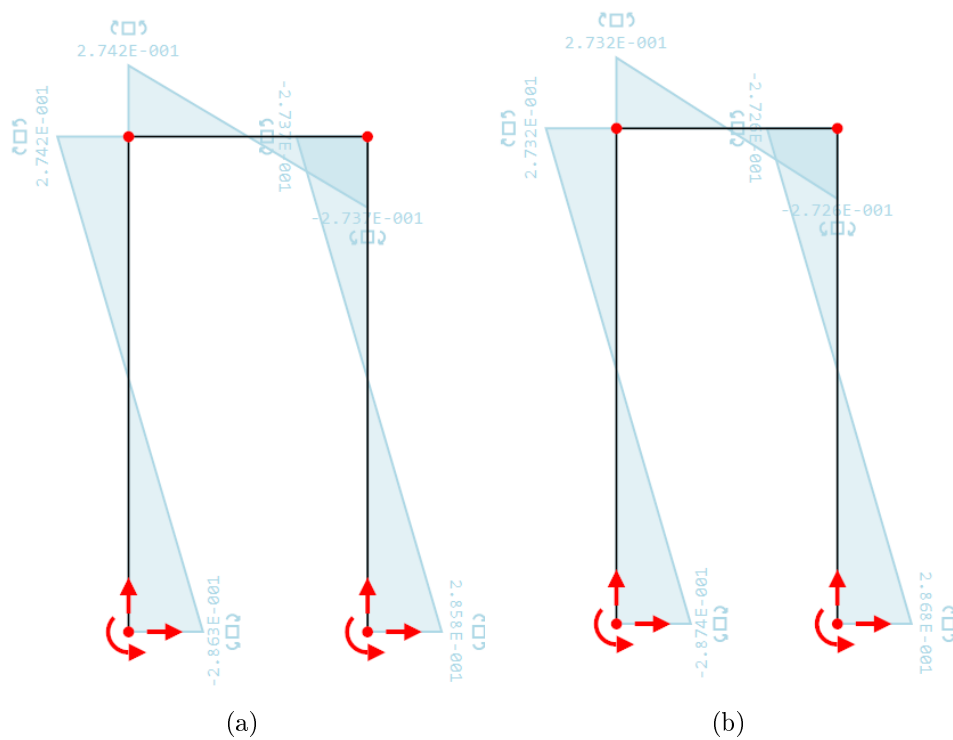


Figure 6.55 Diagramme des moments fléchissant (kNm) : (a) pile 01, (b) pile 02

Par la suite, les courbes d'interaction moment-charge axiale ($M-N$) des poteaux sont calculées pour chaque pile. Pour calculer ces courbes, l'acier est représenté par un modèle bilinéaire, le béton en compression est représenté par le modèle Cusson-Paultre avec un noyau confiné de 106 mm de diamètre [Cusson et Paultre, 1995] et la contribution du béton en tension est négligée. Le moment résistant pour une charge axiale prédéfinie est déterminé lorsque la première des conditions suivantes est atteinte [Paultre, 2011] :

- la fibre extrême en compression atteint une déformation de $-0,0035$ mm/mm ;
- le deuxième rang d'armature atteint la limite élastique.

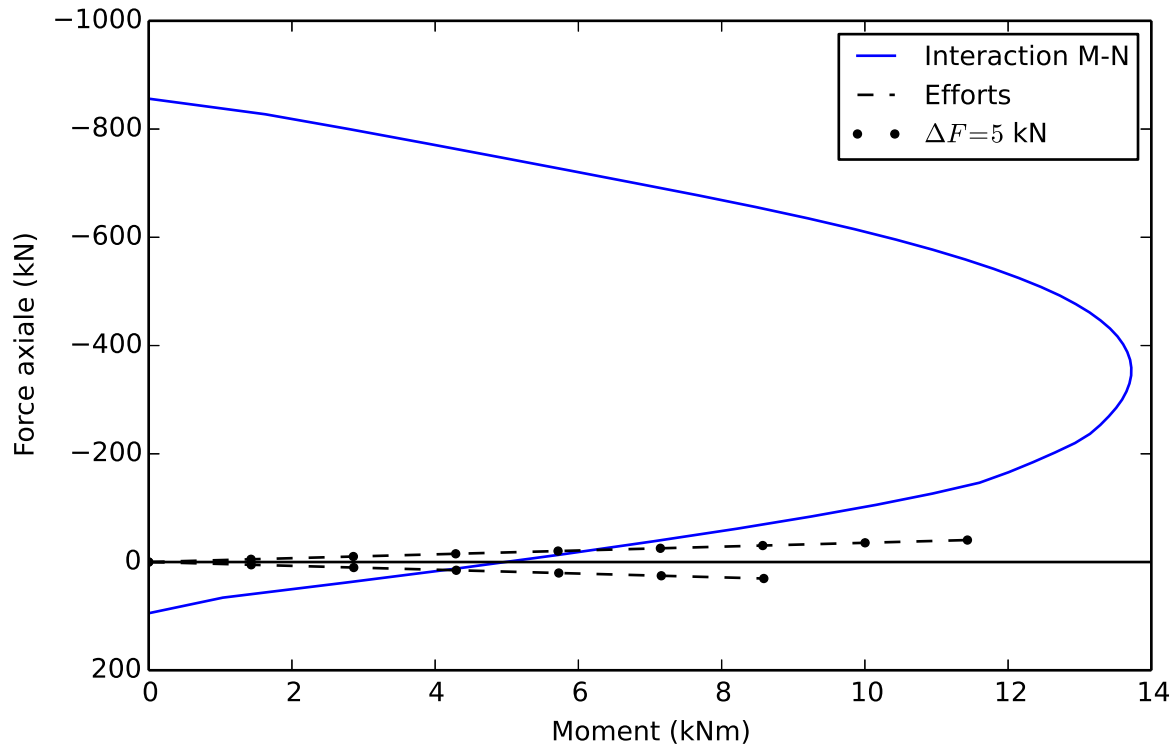
Les propriétés des matériaux utilisés sont présentées au chapitre 4. Les courbes d'interaction sont présentées à la figure 6.56. Ces dernières permettent de tenir compte de la variation des propriétés des matériaux des deux essais.

Finalement, les courbes paramétriques $N(F)$ en fonction de $M(F)$ sont superposées à la courbe d'interaction $M-N$. Les résultats du bas des deux poteaux sont présentés pour chaque pile à la figure 6.56. La force à la limite élastique théorique est définie lorsque la première courbe paramétrique est intersectée par la courbe d'interaction $M-N$. Le tableau 6.4 compare les résultats théoriques obtenue à l'aide des analyses présentés dans la présente section et les résultats expérimentaux des deux piles pour la force, le déplacement et la rigidité.

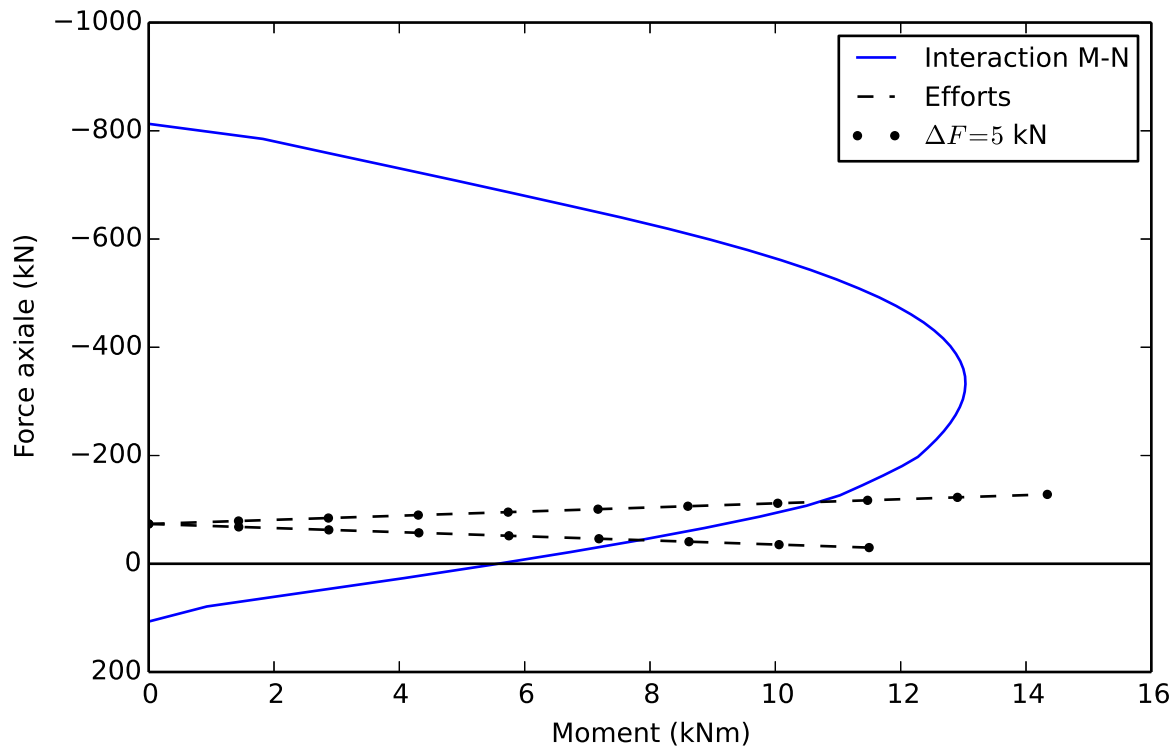
Tableau 6.4 Comparaisons de l'amplification des résultats à la limite élastique

	Pile 01	Pile 02	Pile 02 / Pile 01
Force théorique (kN)	14,5	27,3	1,88
Force expérimentale (kN)	12,8	29,2	2,28
Déplacement théorique (mm)	1,77	3,10	1,75
Déplacement expérimental (mm)	4,90	3,95	0,806
Rigidité théorique (kN/mm)	8,19	8,79	1,07
Rigidité expérimentale (kN/mm)	2,67	7,39	2,77

En comparant les résultats statiques théoriques, on remarque que la force à la limite élastique de la pile 02 est plus grande par un facteur de 1,88 comparativement à la pile 01. Les résultats expérimentaux ont quant à eux un facteur d'augmentation de la résistance de 2,28. En corrigeant la résistance de la pile 01 par le facteur de 1,88, on obtient une force de 24,1 kN. La force pseudo-statique de la pile 02 est donc 1,21 fois plus élevée que la force statique corrigée de l'essai 1.



(a)



(b)

Figure 6.56 Courbe d'interaction M-N : (a) pile 01, (b) pile 02

Les résultats théoriques de la pile 02 du déplacement et de la rigidité sont similaires aux résultats expérimentaux. Cependant, les résultats de la pile 01 ne concordent pas avec la théorie. On remarque que le déplacement expérimental de la pile 01 à la limite élastique est beaucoup plus élevé que le déplacement théorique et même plus élevé que les déplacements expérimentaux et théoriques de la pile 02. Ceci laisse croire que le glissement des barres d'armature peut avoir eu un impact sur les résultats. Selon les résultats théoriques, les différences entre les deux essais ont peu d'impact sur la rigidité. Il y a seulement un facteur d'amplification de 1,07 théorique contrairement à 2,77 pour les résultats expérimentaux.

La figure 6.57 compare l'enveloppe de la courbe d'hystérésis quasi-statique de l'essai 1 à la courbe d'hystérésis pseudo-statique de l'essai 2. Suite aux résultats présentés ci-dessus, l'enveloppe de la pile 01 est corrigée en multipliant la force par 1,88. Les déplacements ne sont pas corrigés étant donné la variation entre les résultats théoriques et pratiques. De plus, en ajustant la force sans corriger le déplacement, la rigidité de la pile 01 corrigée augmente et s'approche du résultat attendu. La pile 01 corrigée reste tout de même moins rigide que la valeur théorique. On remarque que la courbe d'hystérésis pseudo-statique de l'essai 2 est similaire aux résultats de l'essai 1 corrigé. Les différences observables sont l'augmentation de la résistance à la limite élastique et de la rigidité plastique de la pile 02.

Finalement, il est bon de noter que les résultats comparent seulement un essai statique avec un essai dynamique. Bien qu'une augmentation de la force pseudo-statique et de la rigidité plastique est notable entre les deux essais, les résultats doivent être utilisés avec discernement.

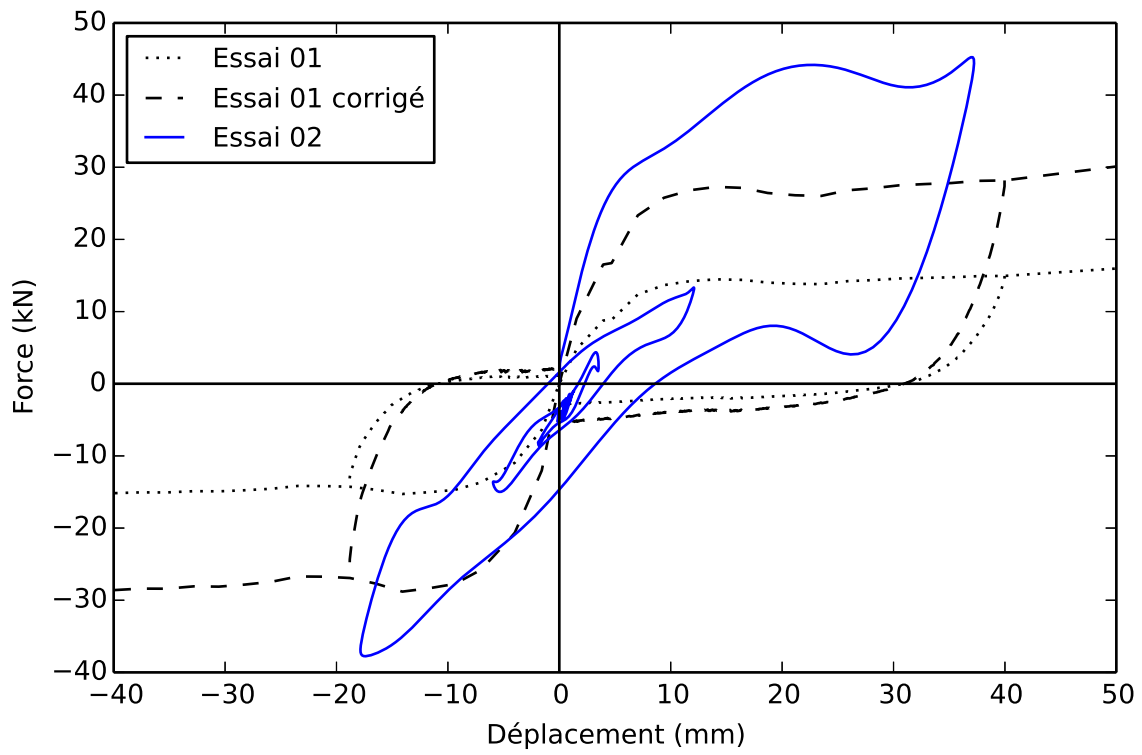


Figure 6.57 Comparaison des courbes d'hystérésis des essais 1 et 2

CHAPITRE 7

CONCLUSION

La norme canadienne CSA-S6-14 et la norme américaine AASHTO LRFD demandent d'appliquer une force statique au niveau de la colonne pour tenir compte des charges d'impact des camions. Cette méthode ne tient pas compte de la nature dynamique du phénomène. Pour approfondir nos connaissances, le projet de recherche présente un essai d'impact en laboratoire simulant la collision d'un camion avec la pile d'un pont à échelle réduite, ainsi qu'un modèle numérique capable de répliquer les résultats. Les résultats démontrent que le montage expérimental reproduit avec succès un tel essai. Des dommages non négligeables sont observables suite à la réponse dynamique de la structure. De plus, la charge pseudo-statique maximum de l'essai mis à l'échelle réelle est supérieure à 1832 kN alors que la norme canadienne exige une charge statique de 1400 kN. Aussi, l'essai dynamique a permis de déterminer d'autres facteurs importants entrant en compte lors d'une charge d'impact.

- Les résultats démontrent que les taux de déformation des armatures longitudinales des poteaux atteignent un ordre de grandeur de 10^{-1} s^{-1} . Donc, les taux de déformation ont un impact sur la résistance des matériaux.
- Le résultat de l'essai dynamique a présenté une augmentation de la force à la limite élastique de la pile de 1,28 comparativement à la résistance corrigée de l'essai quasi-statique. Aussi, la rigidité plastique de la pile est plus élevée lors de l'essai dynamique.

Finalement, les résultats du modèle numérique réalisé avec le logiciel LS-DYNA répliquent adéquatement le phénomène, les efforts et l'endommagement observés en laboratoire.

Les conclusions tendent à démontrer que la norme canadienne CSA-S6-14 aurait avantage à modifier l'article 3.15 pour mieux représenter les efforts engendrés par une collision d'un camion. Cette nouvelle méthode doit prendre en considération les deux phases critiques de la collision :

- les efforts immédiats dus à l'impact du camion avec la structure ;
- les efforts dus à la réponse dynamique de la structure.

La méthode *static bracketed impact analysis*, abordée à la section 2.2.2, est suggérée par [Consolazio *et al.*, 2010] pour les collisions de barges et bateaux sur un pont. Une méthode

similaire pourrait s'appliquer pour les collisions d'un camion. Elle pourrait même être simplifiée considérant que la force due à la collision d'un bateau est déterminée à l'aide d'une analyse de l'énergie cinétique pour tenir compte de la grosseur et vitesse des bateaux circulant sous le pont. Or la vitesse et la masse des véhicules circulant sur les routes sont normées. L'utilisation d'une force prédéterminée reste applicable. La valeur de cette force reste à valider.

Certains, avant de pouvoir conclure sur la validité de la norme, certains points restent à approfondir pour mieux comprendre le phénomène. Voici une liste d'éléments pouvant faire l'objet d'études futures.

- La force d'impact utilisée est basée sur des résultats d'un modèle numérique non calibré pour des collisions frontales. Une confirmation de l'historique de la force permettrait d'obtenir des résultats plus fiables.
- Les essais à échelle réduite utilisent des barres d'armatures lisses. Les résultats de l'essai quasi-statique laissent croire que la perte d'ancrage des barres a pu influencer les résultats obtenus. Avant d'utiliser le modèle numérique à d'autres fins, il serait préférable de le valider avec des essais contenant des barres d'armature crénelées. À défaut d'utiliser des barres d'armature crénelées, des essais en laboratoire pour caractériser la liaison armature-béton permettrait de mieux calibrer les éléments contact du modèle.
- Le cas de chargement simplifié utilisé dans l'essai dynamique consiste à appliquer la charge directement sur la superstructure. Des essais avec la charge appliquée directement sur le poteau permettraient de quantifier l'énergie de l'impact transférée à la superstructure.
- Étudier le phénomène avec différentes géométries et configurations de pont.

ANNEXE A

COMPLÉMENT DU CHAPITRE 4 : EXPÉ- RIMENTAL

A.1 Super-structure

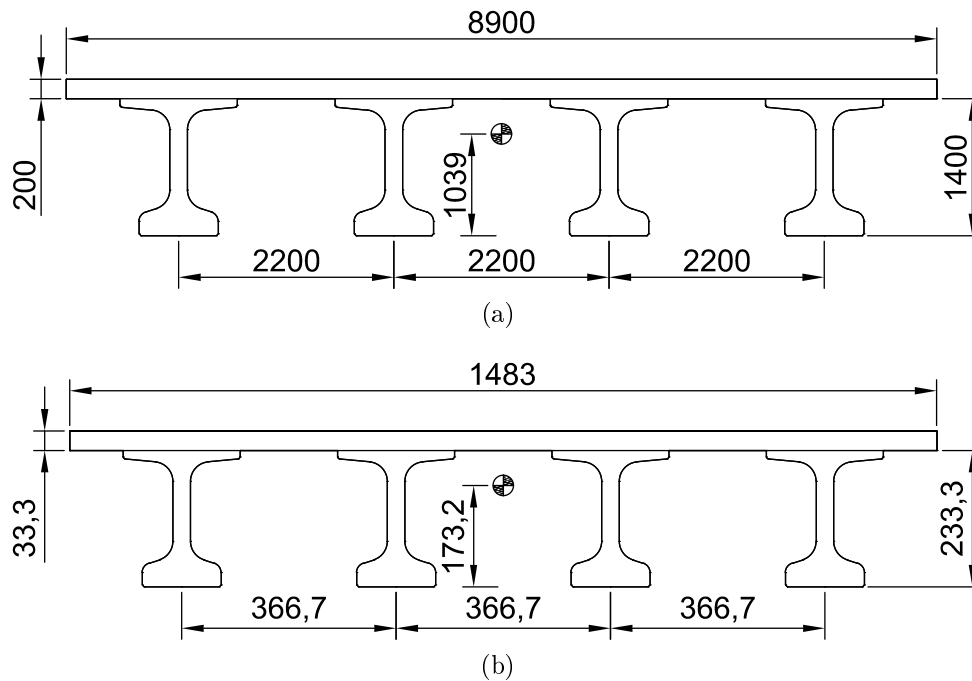


Figure A.1 Coupe de la super-structure : (a) échelle 1 : 1, (b) échelle 1 : 6

Tableau A.1 Masse de la superstructure

		1 : 1		Facteur de Cauchy	1 : 6	
		Totale	Pile		Totale	Pile
Poutres	Tonne	319	159	$\frac{1}{6^3}$	1.48	0.74
Dalle	Tonne	256	128		1.19	0.59
Chasses roues	Tonne	36	18		0.17	0.08
Pavage	Tonne	75	37		0.35	0.17
Diaphragme pile	Tonne	11	11		0.05	0.05
Diaphragmes mi-portées (2)	Tonne	7	3	0.03	0.02	
Masse totale	Tonne	704	357	$1/6^3$	3.26	1.65

A.2 Mélange de béton

Tableau A.2 Recette de béton de la pile 01

Matériaux	unité	Densité	Volume pour 1 m ³
Ciment GU	kg	3.15	352
Eau	kg	1	194
Sable 0-5mm	kg	2.65	802
Pierre 5-14mm	kg	2.75	1077
Entraîneur d'air	ml	1	125
Réducteur d'eau	ml	-	-

Tableau A.3 Recette de béton de la pile 02, colonnes et chevêtre

Matériaux	unité	Densité	Quantité pour 1 m ³	ajustement
Ciment GU	kg	3.15	352	-
Eau	kg	1	211	-
Sable 0-5mm	kg	2.65	782	-
Pierre 5-10mm	kg	2.75	1049	-
Entraîneur d'air	g	1	75	19*
Réducteur d'eau	g	-	-	83*
Agent de viscosité	ml	-	1250	-

* Quantité pour 210 litres de béton

A.3 Plans

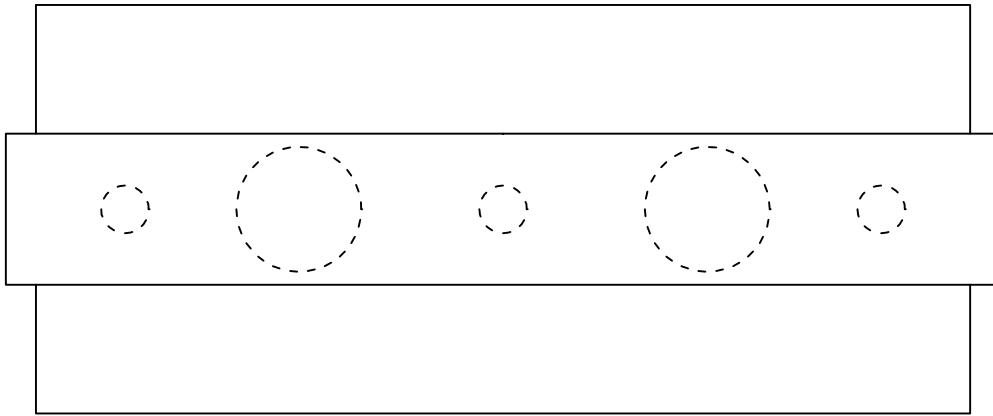
Liste des plans :

Pile 01 - Essai quasi-statique

- 01-01 : Dimensions du spécimen
- 01-02 : Détail de l'armature
- 01-03 : Détail de l'armature
- 01-04 : Emplacement des jauges sur l'armature
- 01-05 : Emplacement de l'instrumentation externe

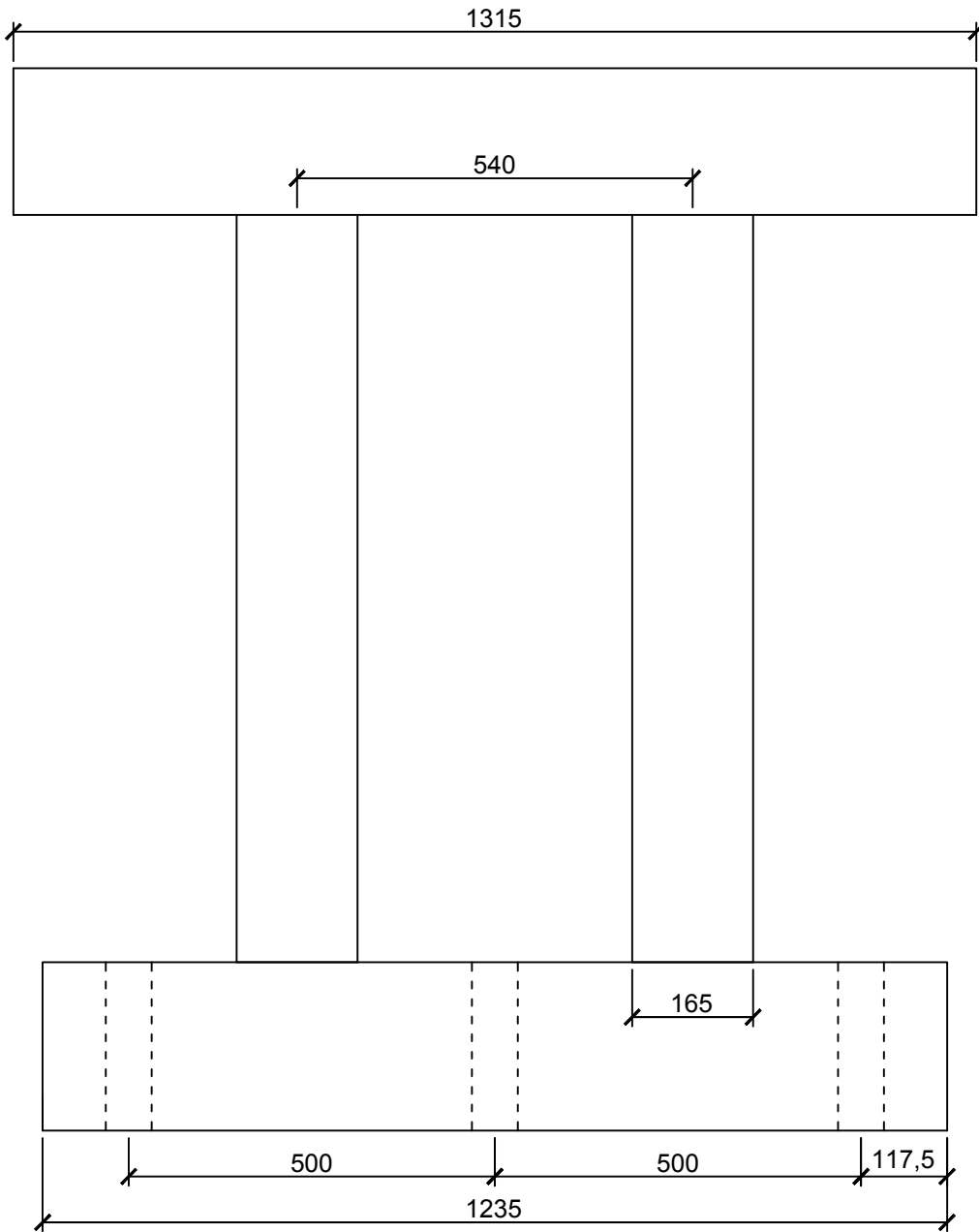
Pile 02 :

- 02-01 : Dimensions du spécimen
- 02-02 : Dimensions du spécimen
- 02-03 : Dimensions du spécimen
- 02-04 : Détail de l'armature
- 02-05 : Détail de l'armature
- 02-06 : Emplacement des jauges sur l'armature
- 02-07 : Emplacement de l'instrumentation externe



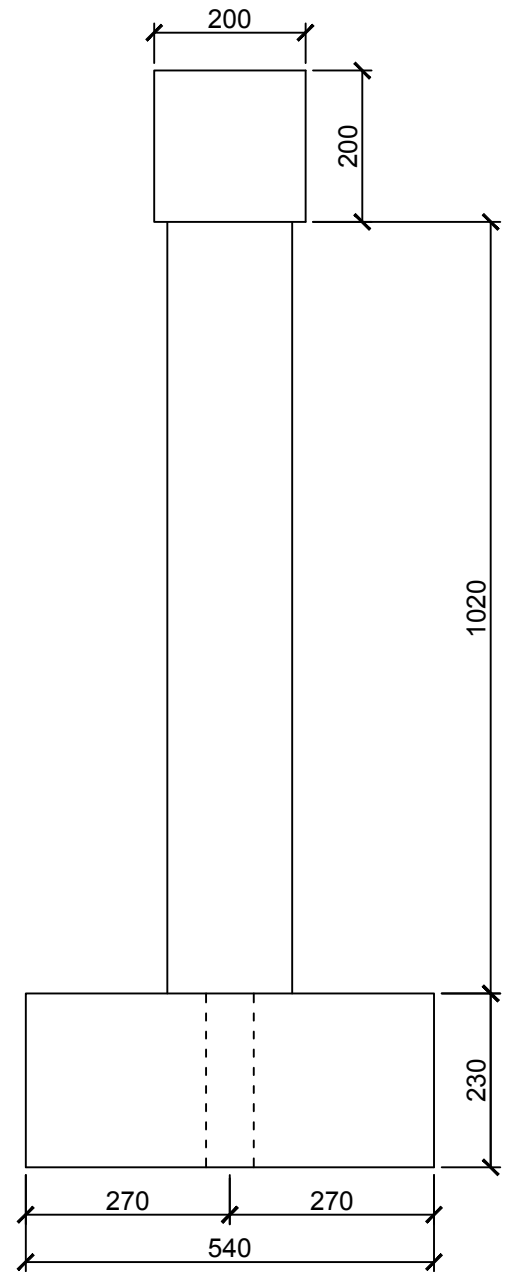
Vue en plan

Échelle : 1:10



Vue en élévation

Échelle : 1:10



Vue de côté

Échelle : 1:10



**UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE**

DESSINE François Settecasi 2015-03-22
 VÉRIFIÉ
 RÉVISION

Pile 01 – Essai quasi-statique
 Dimensions du spécimen

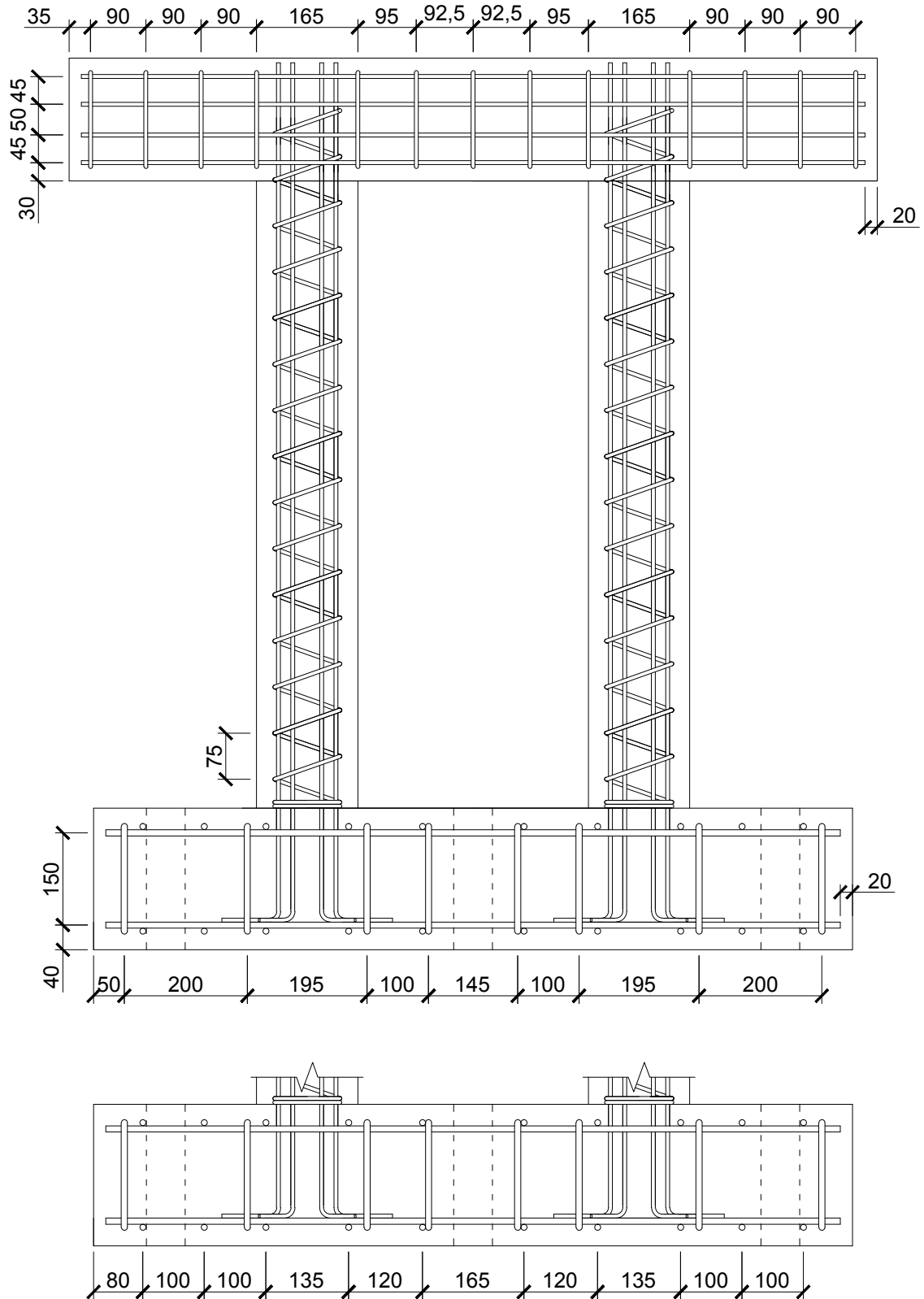
FACTEUR D'ÉCHELLE: 1:6

ÉCHELLE: 1:10

01-01

REV.

0



Détail de l'armature - vue en élévation

Échelle : 1:10



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

DESSINE François Settecasì 2015-03-22

VÉRIFIÉ

RÉVISION

Pile 01 - Essai quasi-statique

Détail de l'armature

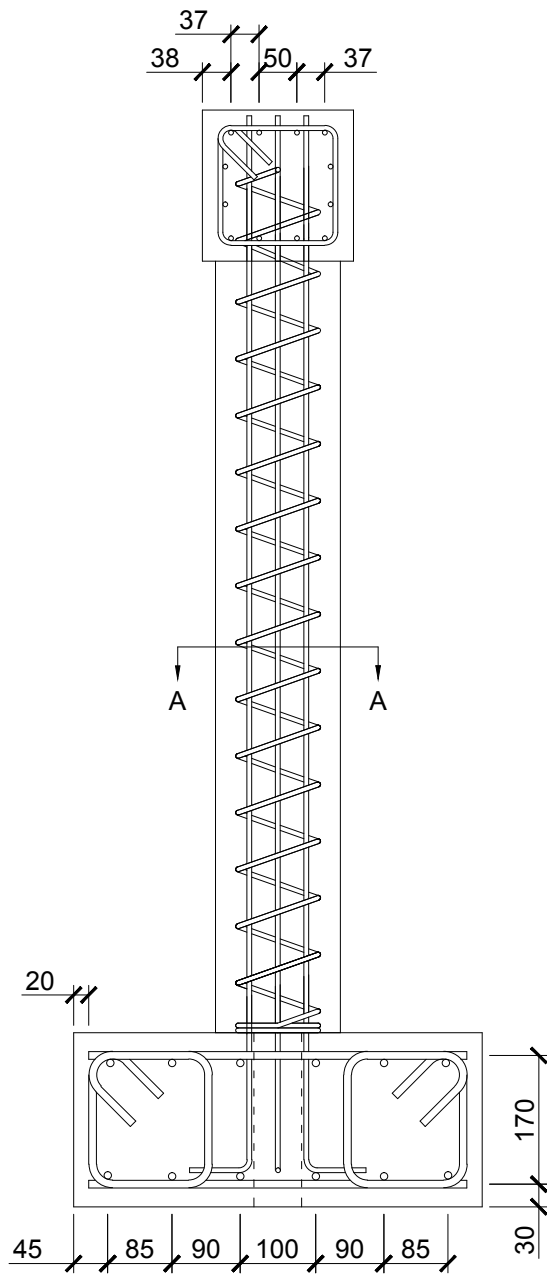
FACTEUR D'ÉCHELLE: 1:6

ÉCHELLE: 1:10

01-02

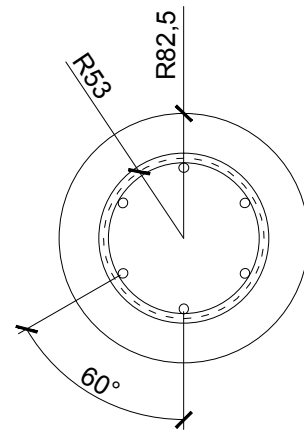
REV.

0



Détail de l'armature - vue de côté

Échelle : 1:10



Coupe A-A

Échelle : 1:5



**UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE**

DESSINE François Settecasì 2015-03-22

VÉRIFIÉ

RÉVISION

Pile 01 - Essai quasi-statique

Détail de l'armature

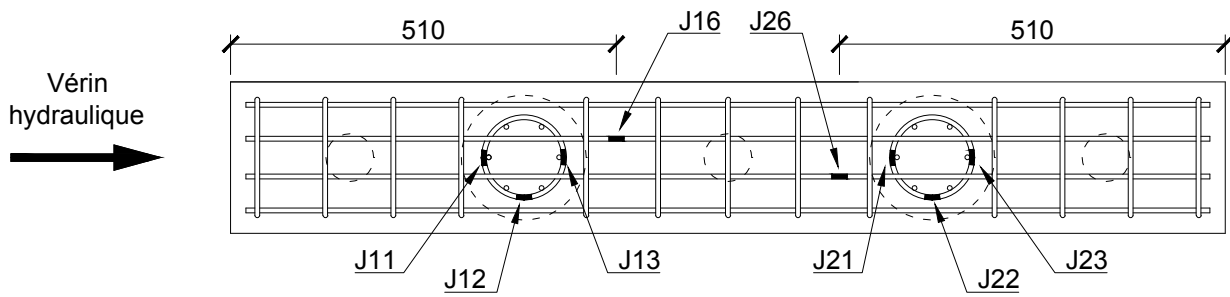
FACTEUR D'ÉCHELLE: 1:6

ÉCHELLE: 1:10

01-03

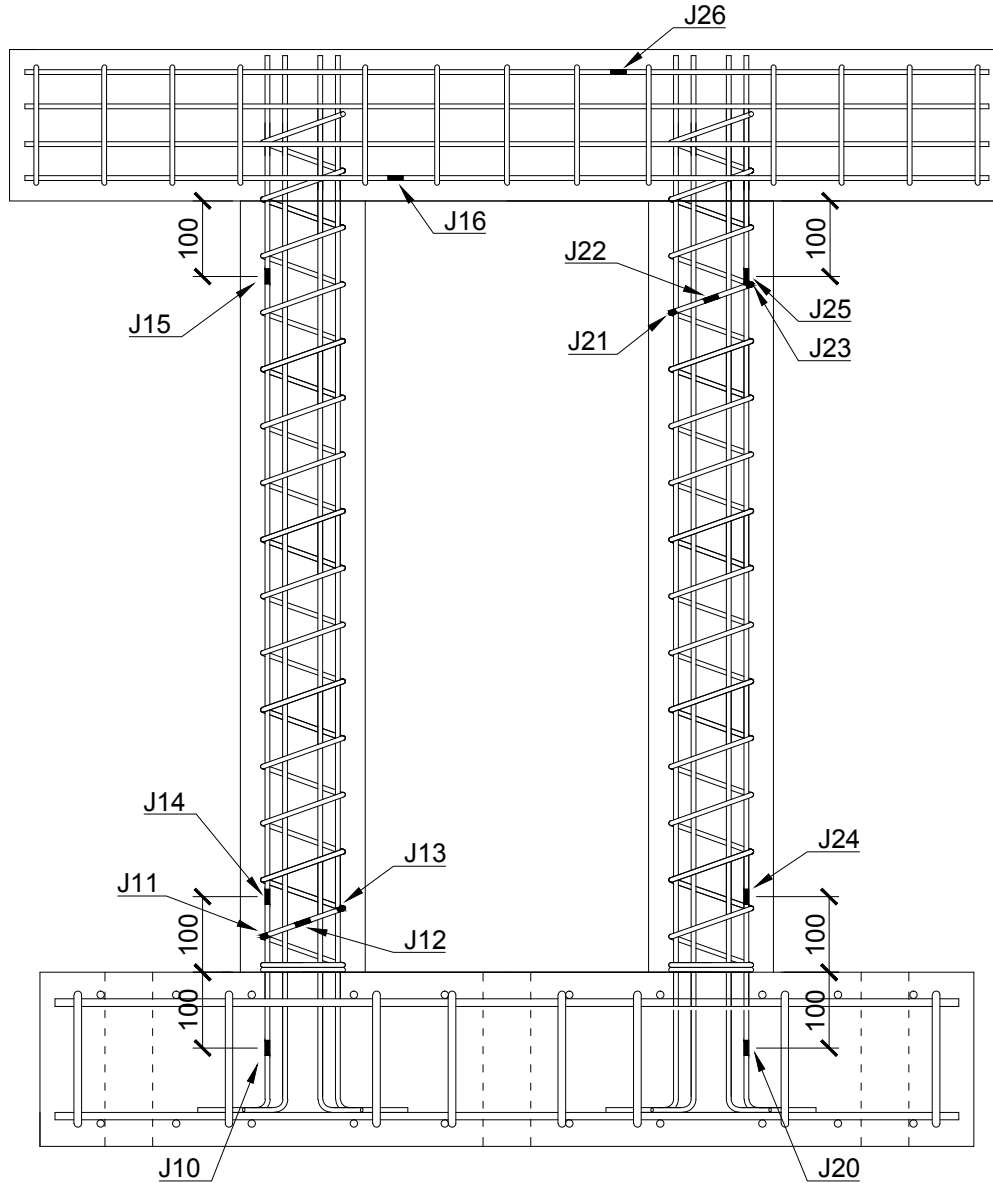
REV

0



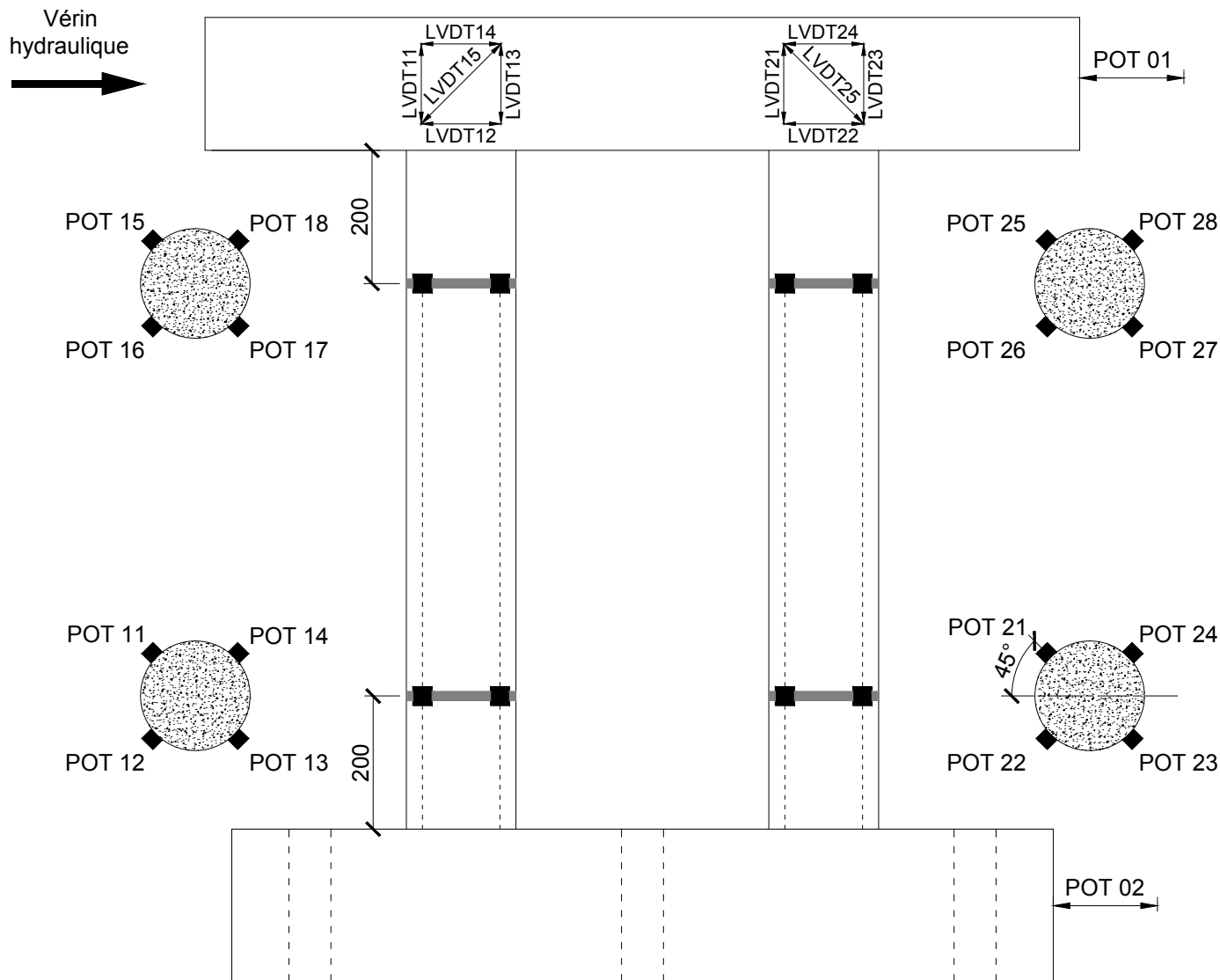
Emplacement des jauges - vue en plan

Échelle : 1:10



Emplacement des jauges - vue en élévation

Échelle : 1:10



Emplacement de l'instrumentation externe

Échelle : 1:10



**UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE**

DESSINE François Settecasi 2015-03-22

VÉRIFIÉ

RÉVISION

Pile 01 - Essai quasi-statique

Emplacement de l'instrumentation externe

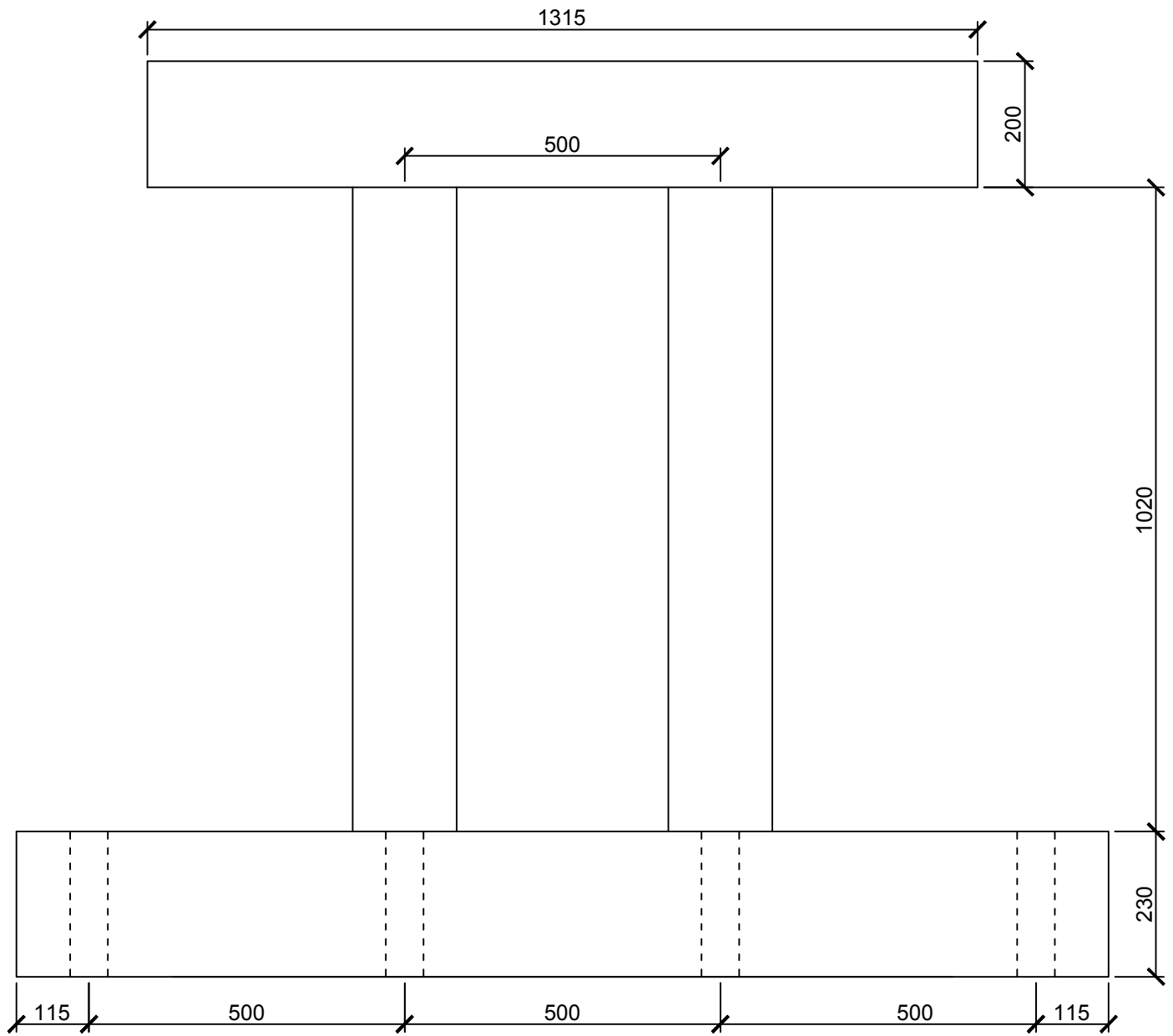
FACTEUR D'ÉCHELLE: 1:6

ÉCHELLE: 1:10

01-05

REV

0



Vue en élévation

Échelle : 1:10



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

DESSINE François Settecasi 2015-03-22

VÉRIFIÉ _____ Pile 02 – Essai dynamique : impact

RÉVISION _____ Dimensions du spécimen

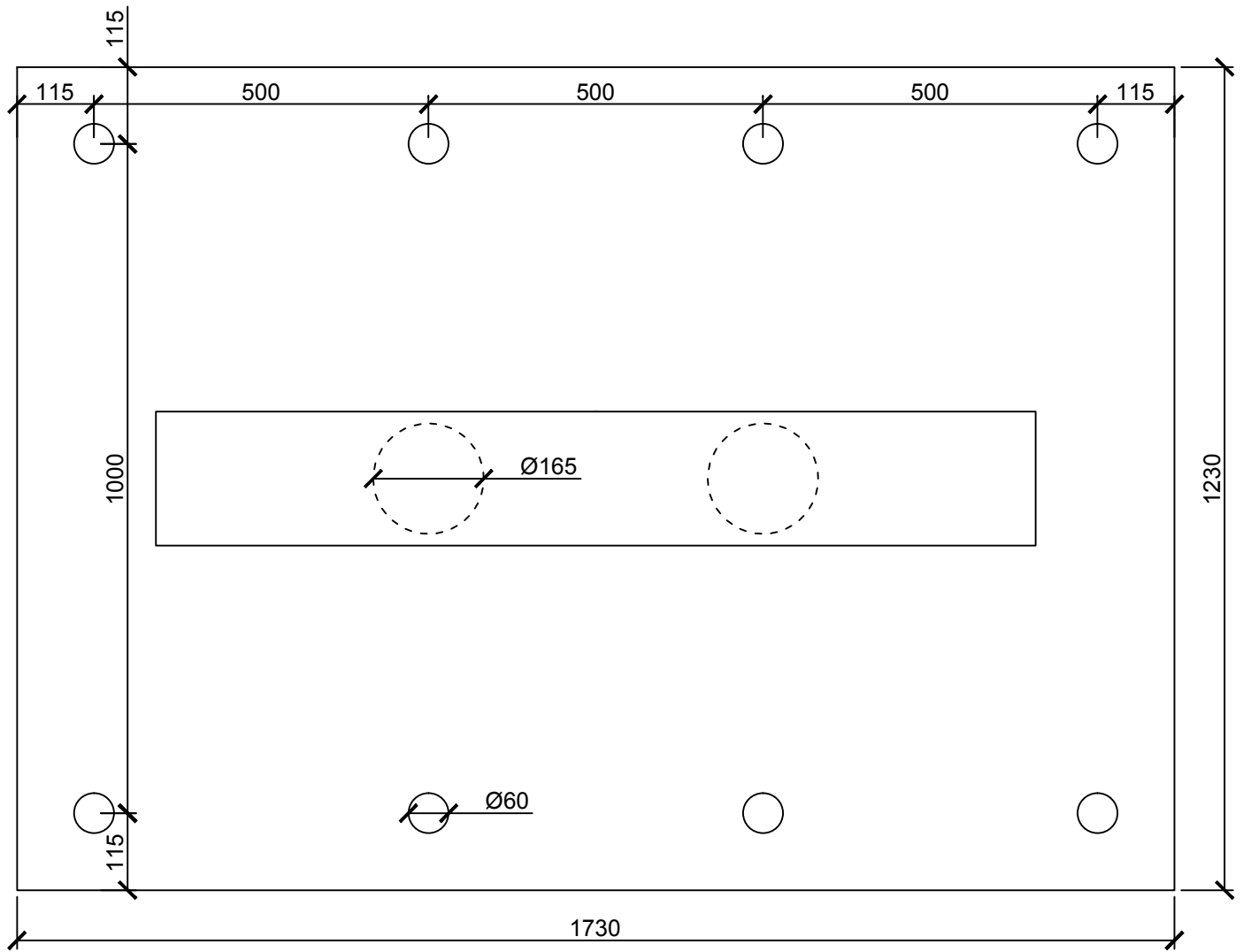
FACTEUR D'ÉCHELLE: 1:6

ÉCHELLE: 1:10

02-01

REV.

0



Vue en plan

Échelle : 1:10



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

DESSINE François Settecasi 2015-03-22

VERIFIÉ

RÉVISION Dimensions du spécimen

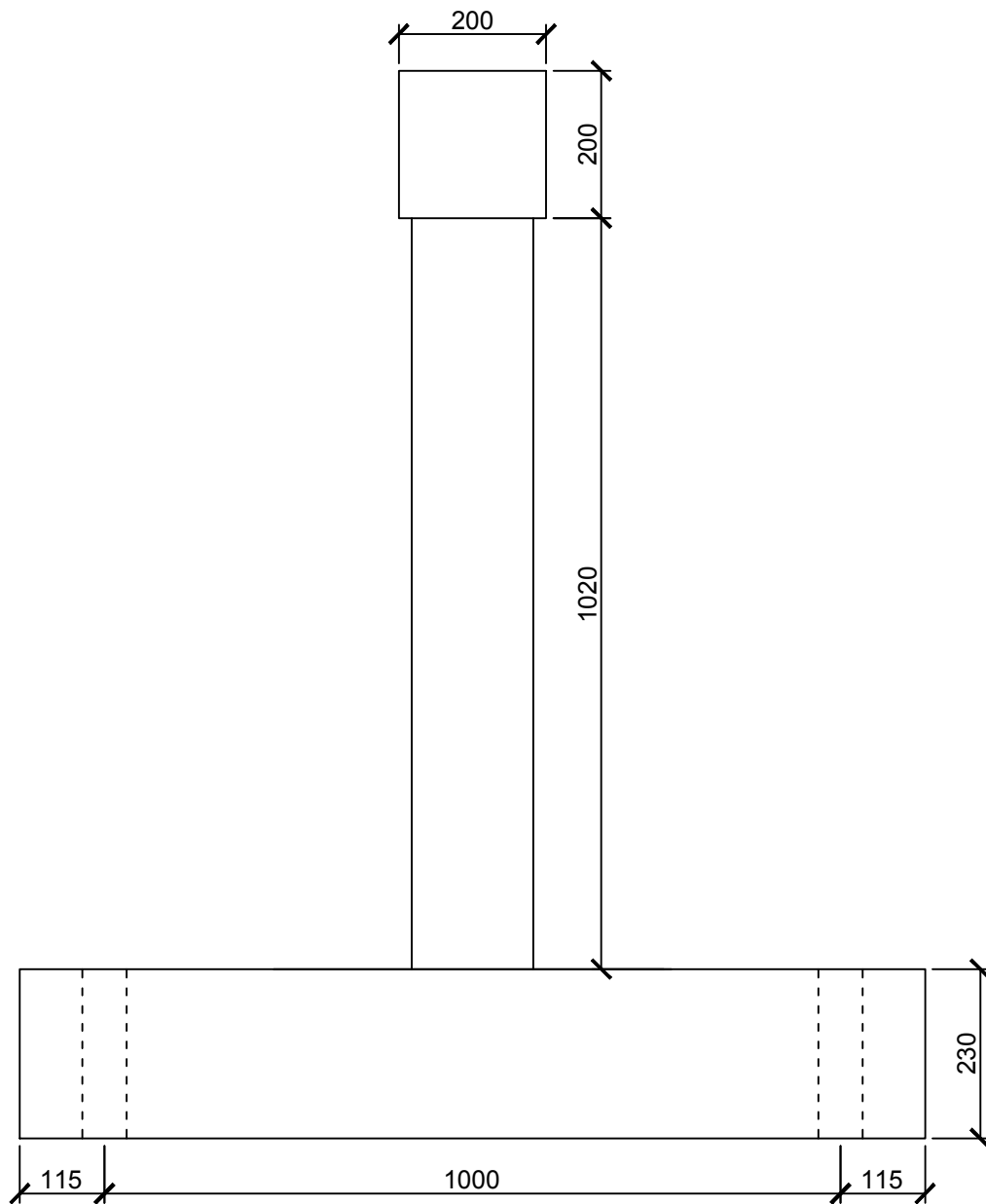
FACTEUR D'ÉCHELLE: 1:6

ÉCHELLE: 1:10

02-02

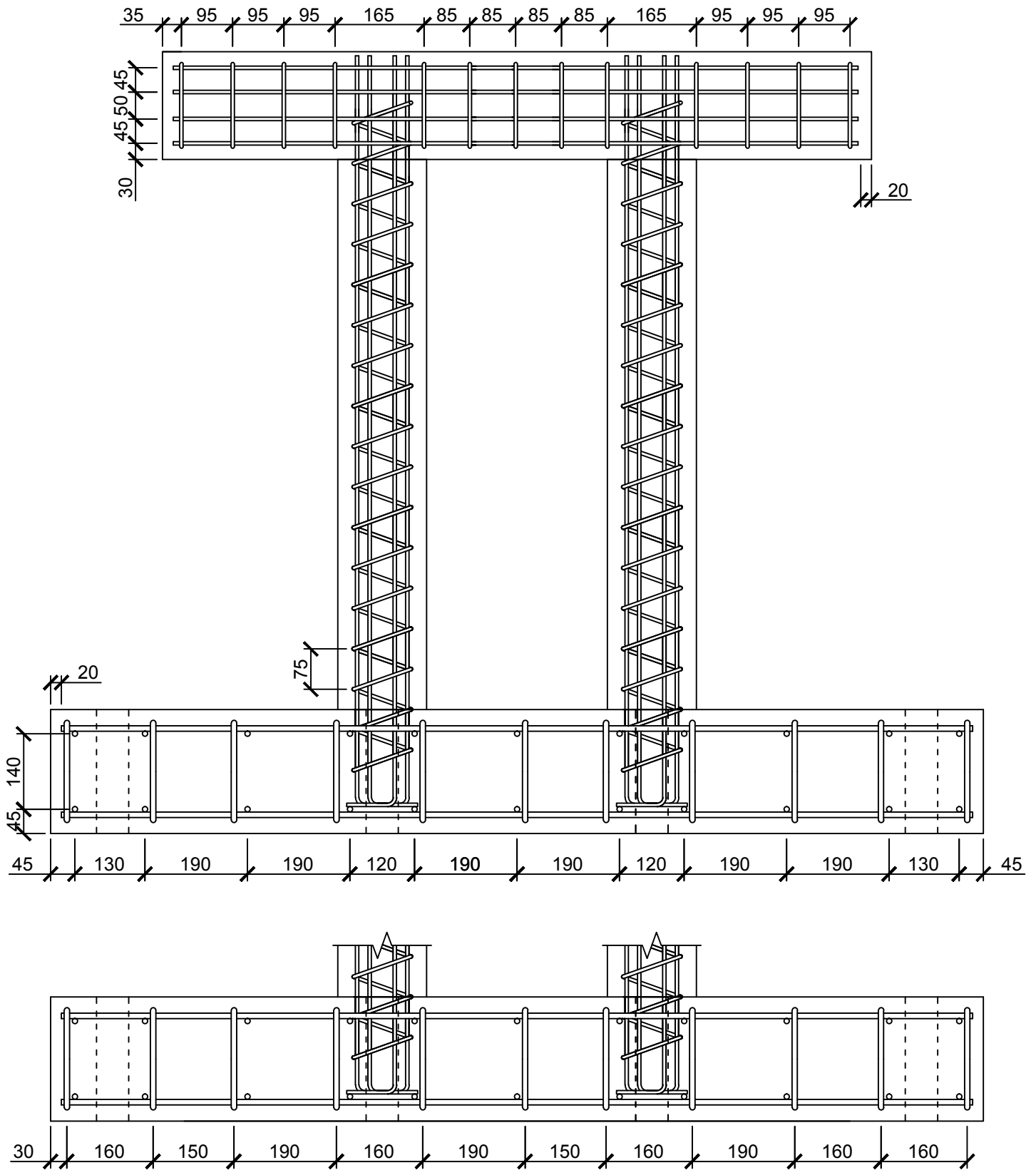
REV.

0



Vue de côté

Échelle : 1:10



Détail de l'armature - vue en élévation

Échelle : 1:10

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

DESSINE François Settecasi 2015-03-22

VÉRIFIÉ

RÉVISION

Pile 02 – Essai dynamique : impact

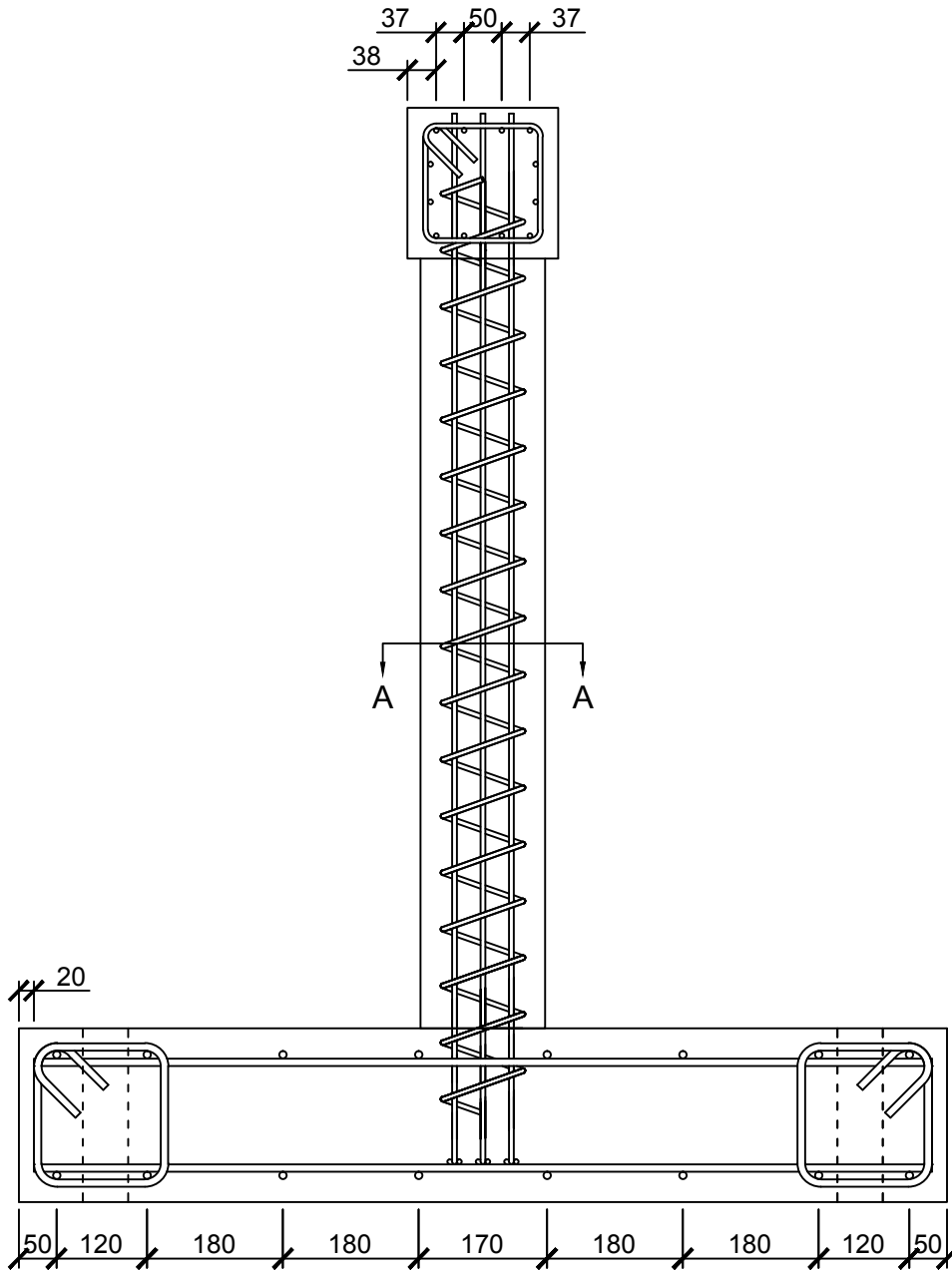
Détail de l'armature

FACTEUR D'ÉCHELLE: 1:6

ÉCHELLE: 1:10

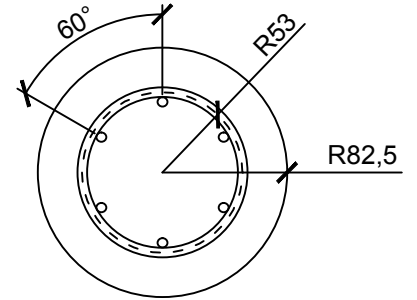
02-04

REV. 0



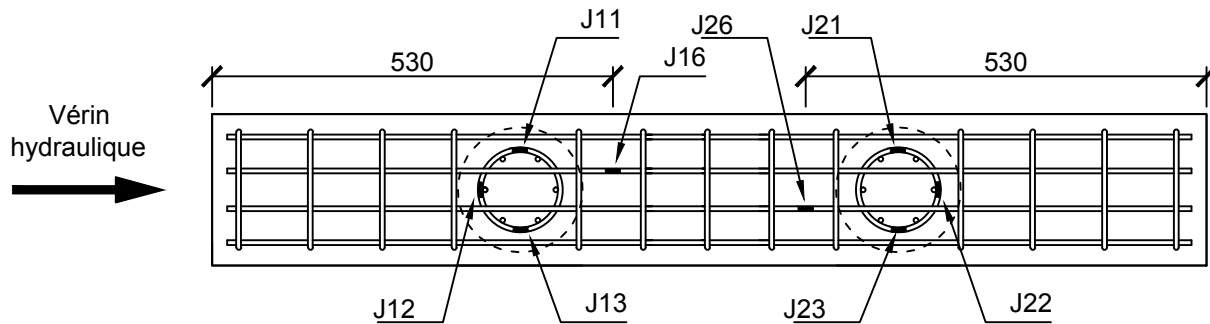
Détail de l'armature - vue de côté

Échelle : 1:10



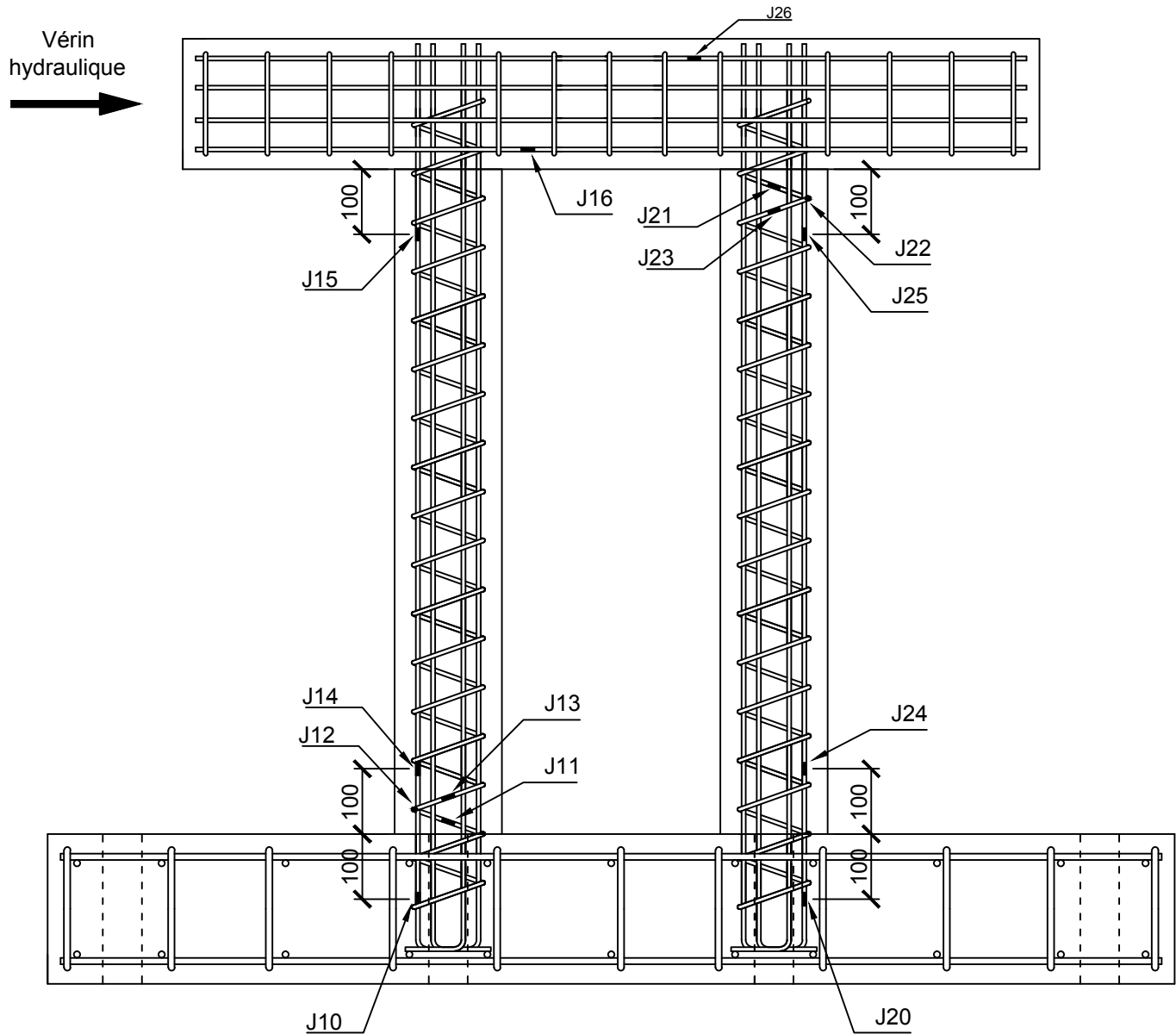
Coupe A-A

Échelle : 1:5



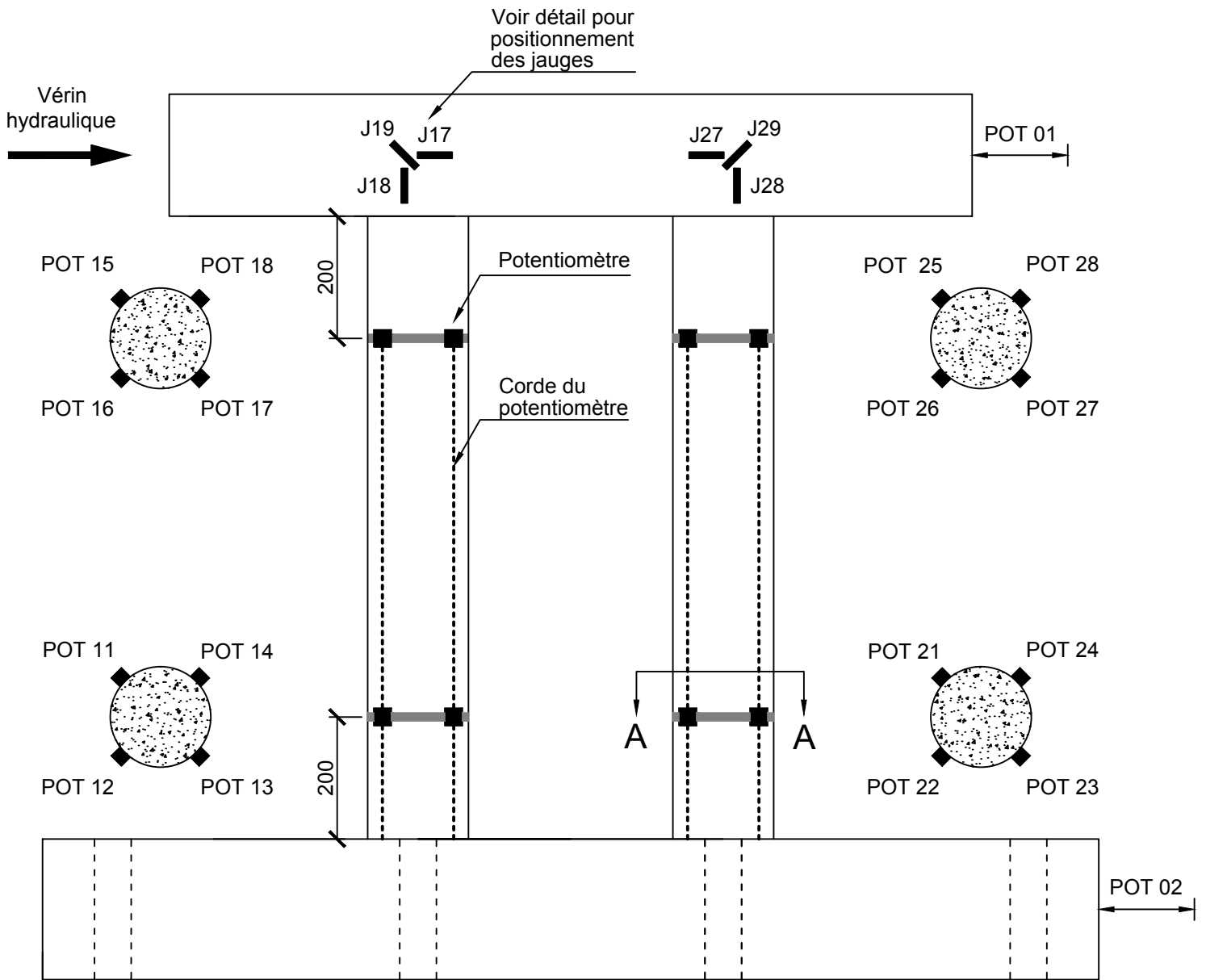
Emplacement des jauges - vue en plan

Échelle : 1:10



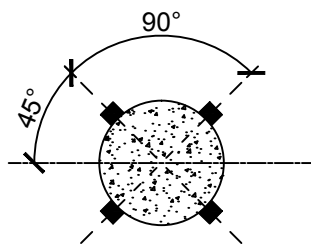
Emplacement des jauges - vue en élévation

Échelle : 1:10



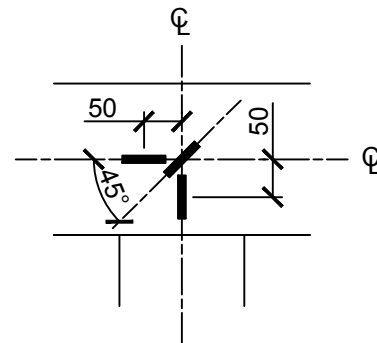
Emplacement de l'instrumentation externe

Échelle : 1:10



Coupe A-A

Échelle : 1:10



Détail du positionnement des jauges à béton

Échelle : 1:10

ANNEXE B

COMPLÉMENT DU CHAPITRE 5 : MODÉ- LISATION

B.1 Code LS-DYNA du modèle 1 simplifié

*KEYWORD

*TITLE

\$# title

File 1_essai quasi statique

*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION

\$#	nrcyck	drtol	drfctr	drterm	tssfdr	irelal	edttl	idrflg
	250	1.0000E-6	0.995000	5.000000	0.000	0	0.040000	1

*CONTROL_ENERGY

\$#	hgen	rwen	slnten	rylen
	2	2	1	1

*CONTROL_TERMINATION

\$#	endtim	endcyc	dtmin	endeng	endmas
	15.940000	0	0.000	0.000	0.000

*DATABASE_ATDOUT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	0	0	1

*DATABASE_BNDOUT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	1	0	1

*DATABASE_DEFORC

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	0	0	1

*DATABASE_ELOUT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	1	0	1

*DATABASE_GLSTAT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	1	0	1

*DATABASE_MATSUM

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	1	0	1

*DATABASE_NODOUT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt	dthf	binhf
	0.001000	1	0	1	0.000	0

*DATABASE_RBDOUT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	1	0	1

*DATABASE_RCFORC

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	1	0	1

*DATABASE_SECFORC

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	0	0	1

*DATABASE_BINARY_D3PLOT

\$#	dt	lcddt	beam	npltc	psetid
	0.000	1	0	0	0

\$# ioopt

3

*DATABASE_CROSS_SECTION_SET_ID

\$#	csid							title
-----	------	--	--	--	--	--	--	-------

1P1

\$#	nsid	hsid	bsid	ssid	tsid	dsid	id	itype
	53	3	4	0	0	0	0	0

*SET_NODE_LIST_TITLE

Section3

\$#	sid	dal	da2	da3	da4	solver		
	53	0.000	0.000	0.000	0.000	MECH		

\$#	nid1	nid2	nid3	nid4	nid5	nid6	nid7	nid8
-----	------	------	------	------	------	------	------	------

[...]

*DATABASE_CROSS_SECTION_SET_ID

\$#	csid							title
-----	------	--	--	--	--	--	--	-------

2P2

\$#	nsid	hsid	bsid	ssid	tsid	dsid	id	itype
	54	4	5	0	0	0	0	0

*SET_NODE_LIST_TITLE

Section4

\$#	sid	dal	da2	da3	da4	solver		
	54	0.000	0.000	0.000	0.000	MECH		

\$#	nid1	nid2	nid3	nid4	nid5	nid6	nid7	nid8
-----	------	------	------	------	------	------	------	------

[...]

*DATABASE_HISTORY_BEAM_SET

\$#	id1	id2	id3	id4	id5	id6	id7	id8
	1	0	0	0	0	0	0	0

```

*DATABASE_HISTORY_DISCRETE
$#   id1      id2      id3      id4      id5      id6      id7      id8
      87111      87112      87113      87114      87115      87116      87117      87118
      87119      87120      87121      87122      104925      104926      104927      104928
      104929      0      0      0      0      0      0      0
*DATABASE_HISTORY_NODE_SET
$#   id1      id2      id3      id4      id5      id6      id7      id8
      2      1      0      0      0      0      0      0
*DATABASE_HISTORY_SOLID_SET
$#   id1      id2      id3      id4      id5      id6      id7      id8
      5      0      0      0      0      0      0      0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID
$#   id
      ldeplacent plaques
$#   pid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
      17      2      2      1      1.000000      01.00000E+28      0.000
*BOUNDARY_SPC_NODE
$#   nid      cid      dofz      dofry      dofzr
[...]
*LOAD_BODY_GENERALIZED_SET_PART
$#   psid      n2      lcid      drlclid      xc      yc      zc
      1      0      3      2      0.000      0.000      0.000
$#   ax      ay      az      omx      omy      omz      cid      angtyp
      0.000      0.000      9810.0000      0.000      0.000      0.000      0CENT
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      15      3      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      16      4      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      17      5      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      18      6      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      19      7      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      20      8      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      21      9      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      22      10      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      23      11      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      24      12      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      25      13      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      26      14      3.175000      36.599998      1000.0000      0.002000      1.0000E-6
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      39      27      3.175000      36.599998      1820.0000      0.002000      0.260000
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      40      28      3.175000      36.599998      1820.0000      0.002000      0.260000
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      41      29      3.175000      36.599998      1820.0000      0.002000      0.260000
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      42      30      3.175000      36.599998      1820.0000      0.002000      0.260000
*CONTACT_1D
$#   nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
      43      31      3.175000      36.599998      1820.0000      0.002000      0.260000

```

```

*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
    44         32  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
    45         33  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
    46         34  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
    47         35  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
    48         36  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
    49         37  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
    50         38  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#  cid                                     title
    1P1_Semelle
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    1         5         0         0         0         0         0         0
$#  fs         fd         dc         vc         vdc         penchk      bt      dt
    0.800000  0.000      0.000      0.000      20.000000  0         0.0001.0000E+20
$#  sfs        sfm        sst        mst        sfst        sfmt        fsf      vsf
    1.000000  1.000000  0.000      0.000      1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
$#  option     nfls      sfls      param      eraten     erates     ct2cn     cn
    2         3.630000  1.270000  0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*SET_SEGMENT_TITLE
P1_Semelle
$#  sid      da1      da2      da3      da4      solver
    1         0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#  n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Semelle_P1
$#  sid      da1      da2      da3      da4      solver
    5         0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#  n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#  cid                                     title
    2P1_Semelle
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    2         6         0         0         0         0         0         0
$#  fs         fd         dc         vc         vdc         penchk      bt      dt
    0.800000  0.000      0.000      0.000      20.000000  0         0.0001.0000E+20
$#  sfs        sfm        sst        mst        sfst        sfmt        fsf      vsf
    1.000000  1.000000  0.000      0.000      1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
$#  option     nfls      sfls      param      eraten     erates     ct2cn     cn
    2         3.630000  1.270000  0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*SET_SEGMENT_TITLE
P2_Semelle
$#  sid      da1      da2      da3      da4      solver
    2         0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#  n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Semelle_P2
$#  sid      da1      da2      da3      da4      solver
    6         0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#  n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#  cid                                     title
    3P1_Chevetre
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    3         7         0         0         0         0         0         0
$#  fs         fd         dc         vc         vdc         penchk      bt      dt
    0.800000  0.000      0.000      0.000      20.000000  0         0.0001.0000E+20
$#  sfs        sfm        sst        mst        sfst        sfmt        fsf      vsf

```

```

1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$# option nfls sfls param eraten erates ct2cn cn
2 3.630000 1.270000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*SET_SEGMENT_TITLE
P2_Chevetre
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
3 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Chevetre_P1
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
7 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$# cid title
4P2_Chevetre
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
4 8 0 0 0 0 0 0
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.800000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$# option nfls sfls param eraten erates ct2cn cn
2 3.630000 1.270000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*SET_SEGMENT_TITLE
P2_Chevetre
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
4 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Chevetre_P2
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
8 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$# cid title
5DalleTop1
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
12 9 0 0 0 0 0 0
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*SET_SEGMENT_TITLE
AncrageAcierTop1
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
12 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
AncrageDalleTop1
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
9 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$# cid title
6DalleTop2
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
13 10 0 0 0 0 0 0
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*SET_SEGMENT_TITLE
AncrageAcierTop2
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
13 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE

```

```

AncrageDalleTop2
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      10      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      7DalleTop3
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      14      11      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000      0.000      0.000      0.000      20.000000      0      0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
*SET_SEGMENT_TITLE
AncrageAcierTop3
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      14      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
AncrageDalleTop3
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      11      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      8DalleBas
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      15      16      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000      0.000      0.000      0.000      20.000000      0      0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
*SET_SEGMENT_TITLE
AncrageDalleBas
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      15      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
AncrageAcierBas
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      16      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      9Plaque1
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      19      17      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000      0.000      0.000      0.000      20.000000      0      0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
*SET_SEGMENT_TITLE
ChevetrePlaque1
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      19      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Plaque1
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      17      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      10Plaque2
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      20      18      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000      0.000      0.000      0.000      20.000000      0      0.0001.0000E+20

```

```

$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000      0.000      0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*SET_SEGMENT_TITLE
ChevetrePlaque2
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
20      0.000      0.000      0.000      0.000 0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Plaque2
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
18      0.000      0.000      0.000      0.000 0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*PART
$# title
SemelleMat72r3
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
1      1      72      72      1      0      0      0
*SECTION_SOLID_TITLE
Beton
$#      secid      elform      aet
1      1      0
$----- MATERIAL CARDS -----
$ Béton généré à 33.53 MPa
$ LS-DYNA Keyword Generated Input for Release III
$ [Default values = K&C generic f'c=6580 psi concrete]
*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3
$#      mid      ro      pr
72 2.3000E-9 0.190000
$#      ft      a0      a1      a2      b1      omega      alf
3.630000 9.911000 0.446300 0.002410 1.600000 0.500000 0.441700
$#      slambda      nout      edrop      rsize      ucf      lcrate      locwidth      npts
100.00000 2.000000 1.000000 0.039370 145.00000 724 25.400000 13.000000
$#      lambda1      lambda2      lambda3      lambda4      lambda5      lambda6      lambda7      lambda8
0.000 8.0000E-6 2.4000E-5 4.0000E-5 5.6000E-5 7.2000E-5 8.8000E-5 3.2000E-4
$#      lambda9      lambda10      lambda11      lambda12      lambda13      b3      a0y      a1y
5.2000E-4 5.7000E-4 1.000000 10.000000 1.0000E+10 1.150000 7.484000 0.625000
$#      eta1      eta2      eta3      eta4      eta5      eta6      eta7      eta8
0.000 0.850000 0.970000 0.990000 1.000000 0.990000 0.970000 0.500000
$#      eta9      eta10      eta11      eta12      eta13      b2      a2f      a2y
0.100000 0.000 0.000 0.000 0.000 1.350000 0.003528 0.007680
$----- EOS-8 CARDS -----
$ Generated EOS 8 (Tabulated Compaction)
*EOS_TABULATED_COMPACTIION
$      EOSID      Gamma      E0      Vo10
$#      eosid      gama      e0      vo
72 0.000 0.000 1.000000
$#      ev1      ev2      ev3      ev4      ev5
0.000 -0.001500 -0.004300 -0.010100 -0.030500
$#      ev6      ev7      ev8      ev9      ev10
-0.051300 -0.072600 -0.094300 -0.174000 -0.208000
$#      c1      c2      c3      c4      c5
0.000 22.104767 48.188393 77.366684 146.99670
$#      c6      c7      c8      c9      c10
221.71080 314.55081 481.22079 2809.5159 4297.1665
$ Multipliers of Gamma*E
$#      t1      t2      t3      t4      t5
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$#      t6      t7      t8      t9      t10
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$#      k1      k2      k3      k4      k5
14736.511 14736.511 14942.822 15694.385 18671.158
$#      k6      k7      k8      k9      k10
21662.672 24639.447 26894.133 60508.113 73682.555
$-----
*HOURLGLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc      qw
1      5 0.030000 1 1.500000 0.060000 0.100000 0.100000
*PART
$# title
SemelleElastique
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
2      1      1      0      1      0      0      0
*MAT_ELASTIC_TITLE

```

```

BetonDalle
$# mid ro e pr da db not used
1 2.3000E-9 19600.000 0.200000 0.000 0.000 0
*PART
$# title
P1
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
3 1 72 72 1 0 0 0
*PART
$# title
P2
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
4 1 72 72 1 0 0 0
*PART
$# title
Chevetre
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
5 1 72 72 1 0 0 0
*PART
$# title
A_Chevetre_Long
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
6 2 3 0 0 0 0 0
*SECTION_BEAM_TITLE
Armature_6.35mm
$# secid elform shrf qr/irid cst scoor nsm
2 1 1.000000 2 1 0.000 0.000
$# ts1 ts2 tt1 tt2 nsloc ntloc
6.350000 6.350000 0.000 0.000 0.000 0.000
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_TITLE
Armature_6.35mm_plastique_cinematique
$# mid ro e pr sigy etan beta
3 7.8000E-9 2.0100E+5 0.300000 498.00000 1013.0000 1.000000
$# src srp fs vp
0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
A_P1_Long
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
7 2 3 0 0 0 0 0
*PART
$# title
A_P2_Long
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
8 2 3 0 0 0 0 0
*PART
$# title
Ancrage_armature
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
9 3 6 0 0 0 0 0
*SECTION_DISCRETE_TITLE
Spring_ancrage_armature
$# secid dro kd v0 cl fd
3 0 0.000 0.000 0.000 0.000
$# cdl tdl
0.000 0.000
*MAT_SPRING_INELASTIC_TITLE
Spring_ancrage_armature
$# mid lcfd ku ctf
6 4 7103.0000 -1.000000
*PART
$# title
A_Chevetre_Cadre
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
10 5 3 0 0 0 0 0
*SECTION_BEAM_TITLE
Armature_Etrier
$# secid elform shrf qr/irid cst scoor nsm
5 1 1.000000 2 1 0.000 0.000
$# ts1 ts2 tt1 tt2 nsloc ntloc
4.490000 4.490000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
A_P1P2_Etrier
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid

```



```

11      5      3      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Plancher
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
      12     1     8     0     0     0     0     0
*MAT_RIGID_TITLE
RigidePlacher
$#   mid   ro     e     pr     n     couple   m     alias
      8 7.8000E-9 2.0000E+5 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#   cmo   con1   con2
1.000000 7     7
$# lco or a1 a2     a3     v1     v2     v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
PlaqueAncrageG
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
      13     1     7     0     0     0     0     0
*MAT_RIGID_TITLE
RigidePlaquesDalle
$#   mid   ro     e     pr     n     couple   m     alias
      7 7.8000E-9 2.0000E+5 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#   cmo   con1   con2
1.000000 0     7
$# lco or a1 a2     a3     v1     v2     v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
PlaqueAncrageC
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
      14     1     7     0     0     0     0     0
*PART
$# title
PlaqueAncrageD
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
      15     1     7     0     0     0     0     0
*PART
$# title
TigesAncrageDalle
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
      16     4     4     0     0     0     0     0
*SECTION_DISCRETE_TITLE
Ancrage_1.5po_spring
$#   secid   dro     kd     v0     c1     fd
      4     0     0.000 0.000 0.000 0.000
$#   cdl     tdl
0.000 0.000
*MAT_SPRING_ELASTIC_TITLE
Spring_tigel.5in-6ft
$#   mid   k
      4 1.2470E+5
*PART
$# title
PlaqueChevetre1
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
      17     1     2     0     0     0     0     0
*MAT_RIGID_TITLE
RigidePlaquesChevetre
$#   mid   ro     e     pr     n     couple   m     alias
      2 7.8000E-9 2.0000E+5 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#   cmo   con1   con2
1.000000 1     5
$# lco or a1 a2     a3     v1     v2     v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
PlaqueChevetre2
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
      18     1     2     0     0     0     0     0
*PART
$# title
TigeChevetre
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
      19     3     5     0     0     0     0     0

```

*MAT_SPRING_ELASTIC_TITLE

Spring_tigel1.5in-1325mm

\$# mid k
5 1.7300E+5

*DEFINE_CURVE_TITLE

ChargementDisplacement

\$#	lcid	sidr	sfa	sfo	offa	offo	dattyp
	1	0	15.000000	1.000000	0.000	0.000	0

\$#	al	o1
	0.000	0.000
	0.001652	0.789500
	0.003304	1.579000
	0.004956	0.789500
	0.006608	0.000
	0.008261	-0.789500
	0.009913	-1.579000
	0.011565	-0.789500
	0.013217	0.000
	0.018142	2.353500
	0.023067	4.707000
	0.027992	2.353500
	0.032917	0.000
	0.037838	-2.351500
	0.042758	-4.703000
	0.047679	-2.351500
	0.052600	0.000
	0.059981	3.527500
	0.067363	7.055000
	0.074745	3.527500
	0.082127	0.000
	0.089521	-3.533500
	0.096915	-7.067000
	0.104309	-3.533500
	0.111703	0.000
	0.121546	4.703500
	0.131389	9.407000
	0.141231	4.703500
	0.151074	0.000
	0.160925	-4.707500
	0.170776	-9.415000
	0.180627	-4.707500
	0.190478	0.000
	0.200329	4.707500
	0.210180	9.415000
	0.220030	4.707500
	0.229881	0.000
	0.239728	-4.705500
	0.249575	-9.411000
	0.259422	-4.705500
	0.269269	0.000
	0.284028	7.053000
	0.298787	14.106000
	0.313546	7.053000
	0.328305	0.000
	0.343073	-7.057000
	0.357840	-14.114000
	0.372608	-7.057000
	0.387375	0.000
	0.402139	7.055000
	0.416902	14.110000
	0.431665	7.055000
	0.446429	0.000
	0.461201	-7.059000
	0.475972	-14.118000
	0.490744	-7.059000
	0.498130	0.000
	0.507977	9.411000
	0.517823	18.822001
	0.527670	9.411000
	0.537517	0.000
	0.547351	-9.398500
	0.557184	-18.797001
	0.567018	-9.398500
	0.576852	0.000
	0.586694	9.406500

0.596536	18.813000						
0.606378	9.406500						
0.616220	0.000						
0.626062	-9.406500						
0.635904	-18.813000						
0.645746	-9.406500						
0.652307	0.000						
0.660509	11.758500						
0.668711	23.517000						
0.676913	11.758500						
0.685115	0.000						
0.693316	-11.756500						
0.701517	-23.513000						
0.709717	-11.756500						
0.717918	0.000						
0.727760	14.110000						
0.737602	28.219999						
0.747444	14.110000						
0.757287	0.000						
0.767129	-14.110000						
0.776971	-28.219999						
0.786813	-14.110000						
0.796656	0.000						
0.808140	16.464001						
0.819624	32.928001						
0.831108	16.464001						
0.842593	0.000						
0.854071	-16.455500						
0.865549	-32.910999						
0.877027	-16.455500						
0.888506	0.000						
0.902445	19.983000						
0.916384	39.966000						
0.930322	19.983000						
0.944261	0.000						
0.958196	-19.976999						
0.972131	-39.953999						
0.986065	-19.976999						
1.000000	0.000						
1.027902	40.000000						
1.031390	45.000000						
1.034878	50.000000						
1.038365	55.000000						
1.041853	60.000000						
1.045341	65.000000						
1.048829	70.000000						
1.052316	75.000000						
1.055804	80.000000						
1.059292	85.000000						
1.062780	90.000000						
*DEFINE_CURVE_TITLE							
DynamicRelaxation							
\$#	lcid	sidr	sfa	sfo	offa	offo	dattyp
	2	1	1.000000	1.000000	0.000	0.000	0
\$#		a1		o1			
		0.000		0.000			
		0.010000		1.000000			
		100.00000		1.000000			
*DEFINE_CURVE_TITLE							
f(t)=1							
\$#	lcid	sidr	sfa	sfo	offa	offo	dattyp
	3	0	1.000000	1.000000	0.000	0.000	0
\$#		a1		o1			
		0.000		1.000000			
		1.000000e+010		1.000000			
*DEFINE_CURVE_TITLE							
Armature lisse							
\$#	lcid	sidr	sfa	sfo	offa	offo	dattyp
	4	0	1.000000	1.000000	0.000	0.000	0
\$#		a1		o1			
		0.000		0.000			
		0.130000		4279.0000			
		0.250000		4915.0000			
		0.380000		5331.0000			
		0.510000		5646.0000			

0.640000	5904.0000							
0.760000	6123.0000							
0.890000	6315.0000							
1.020000	6486.0000							
1.140000	6640.0000							
1.270000	6782.0000							
1.400000	6912.0000							
1.520000	7034.0000							
1.650000	7147.0000							
1.780000	7254.0000							
1.910000	7355.0000							
2.030000	7450.0000							
2.160000	7541.0000							
2.290000	7628.0000							
2.410000	7711.0000							
2.540000	7790.0000							
7.620000	7790.0000							
38.099998	4520.0000							
75.000000	4520.0000							

```

*DEFINE_CURVE_TITLE
MassDampingDR
$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
      7     1 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$#           al           ol
           0.000           0.000
           0.010000         1.000000
           0.100000        10.000000
           0.900000        10.000000
           0.950000         1.000000
          100.000000         1.000000

*DEFINE_CURVE_TITLE
Armature lisse_unloading
$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
      8     0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$#           al           ol
          -0.002500        -15815.000
           0.000           0.000
           1.270000         9021.0000

*DEFINE_CURVE_TITLE
Mat_72R3_Statique
$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
      724   0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$#           al           ol
          -30.000000         1.000000
           30.000000         1.000000

*SET_BEAM_TITLE
[...]
*SET_NODE_LIST_TITLE
[...]
*SET_PART_LIST_TITLE
Gravite
$#   sid   da1   da2   da3   da4   solver
      1   0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$#   pid1  pid2  pid3  pid4  pid5  pid6  pid7  pid8
      1    2    3    4    5    6    7    8
      10   11   17   18    0    0    0    0

*SET_PART_LIST_TITLE
Damping
$#   sid   da1   da2   da3   da4   solver
      2   0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$#   pid1  pid2  pid3  pid4  pid5  pid6  pid7  pid8
      2    6    7    8    9   10   11   16
      19    0    0    0    0    0    0    0

*SET_SOLID_TITLE
[...]
*SET_SOLID_TITLE
Elout
$#   sid   solver
      5MECH
$#   k1   k2   k3   k4   k5   k6   k7   k8
      5167 5168 5169 7343 7344 7345 20399 20400
      20401 22575 22576 22577 0 0 0 0

*DAMPING_PART_MASS_SET
$#   psid  lcid   sf   flag
      2    3 4.270754 0

```

```

*DAMPING_PART_MASS_SET
$#   psid      lcid      sf      flag
    2          7 4.270754      0
*DAMPING_PART_STIFFNESS_SET
$#   psid      coef
    2 0.020000
*ELEMENT_SOLID
$#   eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
[...]
*ELEMENT_BEAM
$#   eid      pid      n1      n2      n3      rt1      rr1      rt2      rr2      local
[...]
*ELEMENT_DISCRETE
$#   eid      pid      n1      n2      vid      s      pf      offset
    87111      9 131516  96553      0      0.000      0      0.000
    87112      9 131517  96763      0      0.000      0      0.000
    87113      9 131515  97603      0      0.000      0      0.000
    87114      9 131518  96973      0      0.000      0      0.000
    87115      9 131513  97183      0      0.000      0      0.000
    87116      9 131514  97393      0      0.000      0      0.000
    87117      9 131519  98443      0      0.000      0      0.000
    87118      9 131520  98653      0      0.000      0      0.000
    87119      9 131524  98233      0      0.000      0      0.000
    87120      9 131523  98023      0      0.000      0      0.000
    87121      9 131522  97813      0      0.000      0      0.000
    87122      9 131521  98863      0      0.000      0      0.000
   104925     16 126244  129022      0      0.000      0      0.320000
   104926     16 126344  129023      0      0.000      0      0.320000
   104927     16 126294  129024      0      0.000      0      0.320000
   104928     19 130740  130126      0      0.000      0      0.116000
   104929     19  54531  130484      0      0.000      0      0.116000
*ELEMENT_MASS
$#   eid      nid      mass      pid
    1   92147      0.086000     17
    2   91361      0.086000     18
    3  131513      0.001000      0
    4  131514      0.001000      0
    5  131515      0.001000      0
    6  131516      0.001000      0
    7  131517      0.001000      0
    8  131518      0.001000      0
    9  131519      0.001000      0
   10  131520      0.001000      0
   11  131521      0.001000      0
   12  131522      0.001000      0
   13  131523      0.001000      0
   14  131524      0.001000      0
   15  129023      0.001000      0
   16  129022      0.001000      0
   17  129024      0.001000      0
*NODE
[...]
*END*END

```

B.2 Code LS-DYNA du modèle 2.1 simplifié

*KEYWORD

*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION

\$# nrcyck drtol drfctr drterm tssfdr irelal edttl idrflg
 250 1.0000E-4 0.995000 0.500000 0.000 0 0.040000 1

*CONTROL_ENERGY

\$# hgen rwen slnten rylen
 2 2 1 1

*CONTROL_TERMINATION

\$# endtim endcyc dtmin endeng endmas
 10.000000 0 0.000 0.000 0.000

*CONTROL_TIMESTEP

\$# dtinit tssfac isdo tslimt dt2ms lctm erode mslst
 0.000 0.900000 0 0.000 0.000 0 0 0
 \$# dt2msf dt2mslc imscl unused unused rmscl
 0.000 0 0 0 0 0.000

*DATABASE_BNDOUT

\$# dt binary lcur iopt
 0.001000 2 0 1

*DATABASE_ELOUT

\$# dt binary lcur iopt
 0.001000 2 0 1

*DATABASE_GLSTAT

\$# dt binary lcur iopt
 0.001000 2 0 1

*DATABASE_MATSUM

\$# dt binary lcur iopt
 0.001000 2 0 1

*DATABASE_NODOUT

\$# dt binary lcur iopt dthf binhf
 0.001000 2 0 1 0.000 0

*DATABASE_RBDOUT

\$# dt binary lcur iopt
 0.001000 2 0 1

*DATABASE_RCFORC

\$# dt binary lcur iopt
 0.001000 2 0 1

*DATABASE_SPCFORC

\$# dt binary lcur iopt
 0.001000 2 0 1

*DATABASE_BINARY_D3PLOT

\$# dt lcdt beam npltc psetid
 0.100000 0 0 0 0
 \$# iopt
 3

*DATABASE_HISTORY_BEAM_SET

\$# id1 id2 id3 id4 id5 id6 id7 id8
 1 0 0 0 0 0 0 0

*DATABASE_HISTORY_NODE_SET

\$# id1 id2 id3 id4 id5 id6 id7 id8
 2 1 155 0 0 0 0 0

*BOUNDARY_SPC_SET_ID

\$# id heading
 1Ancrage
 \$# nsid cid dofx dofy dofz dofrx dofry dofrz
 3 0 1 1 1 0 0 0

*SET_NODE_LIST_TITLE

Ancrage
 \$# sid da1 da2 da3 da4 solver
 3 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
 \$# nid1 nid2 nid3 nid4 nid5 nid6 nid7 nid8
 [...]

*BOUNDARY_SPC_SET_ID

\$# id heading
 0SuperStructure
 \$# nsid cid dofx dofy dofz dofrx dofry dofrz
 154 0 1 1 1 0 0 0

*SET_NODE_LIST_TITLE

NODESET(SPC) 154
 \$# sid da1 da2 da3 da4 solver
 154 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
 \$# nid1 nid2 nid3 nid4 nid5 nid6 nid7 nid8
 131779 131780 131781 0 0 0 0 0

*LOAD_BODY_GENERALIZED_SET_PART

\$#	psid	n2	lcid	drlcid	xc	yc	zc		
	1	0	3	2	0.000	0.000	0.000		
\$#	ax	ay	az	omx	omy	omz	cid	angtyp	
	0.000	0.000	9810.0000	0.000	0.000	0.000	0CENT		
	3	0	3	2	0.000	0.000	0.000		
	0.000	0.000	58860.000	0.000	0.000	0.000	0CENT		
*LOAD_RIGID_BODY									
\$#	pid	dof	lcid	sf	cid	m1	m2	m3	
	12	2	1	0.500000	0	0	0	0	
	13	2	1	0.500000	0	0	0	0	
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	16	4	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	17	5	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	18	6	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	19	7	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	20	8	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	21	9	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	22	10	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	23	11	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	24	12	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	25	13	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	26	14	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	27	15	3.175000	36.599998	1180.0000	0.002000	0.500000		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	16	4	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	17	5	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	18	6	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	19	7	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	20	8	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	21	9	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	22	10	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	23	11	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		
	24	12	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4		
*CONTACT_1D									
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp		

25	13	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
26	14	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
27	15	3.175000	36.599998	640.00000	0.002000	1.0000E-4
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
40	28	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
41	29	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
42	30	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
43	31	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
44	32	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
45	33	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
46	34	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
47	35	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
48	36	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
49	37	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
50	38	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
51	39	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
103	52	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
104	53	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
105	54	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
106	55	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
107	56	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
108	57	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
109	58	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
110	59	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
111	60	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
112	61	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp

113	62	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
114	63	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
115	64	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
116	65	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
117	66	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
118	67	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
119	68	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
120	69	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
121	70	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
122	71	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
123	72	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
124	73	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
125	74	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
126	75	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
127	76	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
128	77	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
129	78	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
130	79	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
131	80	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
132	81	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
133	82	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
134	83	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
135	84	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
136	85	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
137	86	3.175000	36.599998	1820.0000	0.002000	0.260000
*CONTACT_1D						
\$# nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp

```

138      87  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
139      88  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
140      89  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
141      90  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
142      91  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
143      92  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
144      93  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
145      94  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
146      95  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
147      96  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
148      97  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
149      98  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
150      99  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
151     100  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
152     101  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_1D
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
153     102  3.175000  36.599998  1820.0000  0.002000  0.260000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#  cid                                     title
1P1_Semelle
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
1      5      0      0      0      0      0      0
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.800000  0.000  0.000  0.000  0.020000  0      0.0001.0000E+20
$#  sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000  1.000000  0.000  0.000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
$#  option      nfls      sfls      param      eraten      erates      ct2cn      cn
2  3.600000  1.270000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
*SET_SEGMENT_TITLE
P1_bas
$#  sid      da1      da2      da3      da4      solver
1      0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#  n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Semelle_p1
$#  sid      da1      da2      da3      da4      solver
5      0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#  n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#  cid                                     title
2P1_Semelle
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
2      6      0      0      0      0      0      0
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt

```

```

0.800000 0.000 0.000 0.000 0.020000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$# option nfls sfls param eraten erates ct2cn cn
2 3.600000 1.270000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*SET_SEGMENT_TITLE
P2_bas
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
2 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Semelle_P2
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
6 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$# cid title
3P1_Chevetre
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
3 7 0 0 0 0 0 0
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.800000 0.000 0.000 0.000 0.020000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$# option nfls sfls param eraten erates ct2cn cn
2 3.600000 1.270000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*SET_SEGMENT_TITLE
P1_haut
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
3 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Chevetre_P1
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
7 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$# cid title
4P2_Chevetre
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
4 8 0 0 0 0 0 0
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.800000 0.000 0.000 0.000 0.020000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$# option nfls sfls param eraten erates ct2cn cn
2 3.600000 1.270000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*SET_SEGMENT_TITLE
P2_haut
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
4 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*SET_SEGMENT_TITLE
Chevetre_P2
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
8 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# n1 n2 n3 n4 a1 a2 a3 a4
[...]
*PART
$# title
Semelle1
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
1 1 72 72 1 0 0 0
*SECTION_SOLID_TITLE
Beton
$# secid elform aet
1 1 0
$Béton généré avec cylindre 150x300
$Calibration jour de l'essai/Calib_04/03_02_eta2/
$----- MATERIAL CARDS -----

```

```

$ LS-DYNA Keyword Generated Input for Release III
$ [Default values = K&C generic f'c=6580 psi concrete]
*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3
$ MATID RO PR
$# mid ro pr
$ 72 2.2800E-9 0.190000
$ ft A0 A1 A2 B1 OMEGA A1F
$# ft a0 a1 a2 b1 omega alf
$ 5.220000 9.090000 0.446000 0.002630 1.600000 0.500000 0.442000
$ sLambda NOUT EDROP RSIZE UCF LCRate LocWidth NPTS
$# slambda nout edrop rsize ucf lcrate locwidth npts
$ 100.00000 2.000000 1.000000 0.039400 145.00000 723 25.400000 13.000000
$ Lambda01 Lambda02 Lambda03 Lambda04 Lambda05 Lambda06 Lambda07 Lambda08
$# lambda1 lambda2 lambda3 lambda4 lambda5 lambda6 lambda7 lambda8
$ 0.000 8.0000E-6 2.4000E-5 4.0000E-5 5.3000E-5 7.5000E-5 9.3000E-5 1.2000E-4
$ Lambda09 Lambda10 Lambda11 Lambda12 Lambda13 B3 A0Y A1Y
$# lambda09 lambda10 lambda11 lambda12 lambda13 b3 a0y a1y
$ 6.0000E-4 8.0000E-4 0.005000 10.000000 1.0000E+10 1.150000 6.860000 0.625000
$ Eta01 Eta02 Eta03 Eta04 Eta05 Eta06 Eta07 Eta08
$# eta1 eta2 eta3 eta4 eta5 eta6 eta7 eta8
$ 0.000 0.850000 0.970000 0.990000 1.000000 0.990000 0.970000 0.500000
$ Eta09 Eta10 Eta11 Eta12 Eta13 B2 A2F A2Y
$# eta09 eta10 eta11 eta12 eta13 b2 a2f a2y
$ 0.300000 0.100000 0.000 0.000 0.000 1.350000 0.003850 0.008370
$----- EOS-8 CARDS -----
$ Generated EOS 8 (Tabulated Compaction)
*EOS_TABULATED_COMPACTION
$ EOSID Gamma E0 Vol0
$# eosid gama e0 vo
$ 72 0.000 0.000 1.000000
$ VolStrain01 VolStrain02 VolStrain03 VolStrain04 VolStrain05
$# ev1 ev2 ev3 ev4 ev5
$ 0.000 -0.001500 -0.004300 -0.010100 -0.030500
$ VolStrain06 VolStrain07 VolStrain08 VolStrain09 VolStrain10
$# ev6 ev7 ev8 ev9 ev10
$ -0.051300 -0.072600 -0.094300 -0.174000 -0.208000
$ Pressure01 Pressure02 Pressure03 Pressure04 Pressure05
$# c1 c2 c3 c4 c5
$ 0.000 21.200001 46.099998 74.099998 141.00000
$ Pressure06 Pressure07 Pressure08 Pressure09 Pressure10
$# c6 c7 c8 c9 c10
$ 212.00000 301.00000 461.00000 2690.0000 4110.0000
$ Multipliers of Gamma*E
$# t1 t2 t3 t4 t5
$ 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$# t6 t7 t8 t9 t10
$ 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$ BulkUnld01 BulkUnld02 BulkUnld03 BulkUnld04 BulkUnld05
$# k1 k2 k3 k4 k5
$ 14800.000 14800.000 15000.000 15800.000 18800.000
$# k6 k7 k8 k9 k10
$ 21800.000 24800.000 27000.000 60800.000 74100.000
$-----
*HOURLGLASS
$# hgid ihq qm ibq q1 q2 qb/vdc qw
$ 1 5 0.030000 0 1.500000 0.060000 0.100000 0.100000
*PART
$# title
P1
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
$ 2 1 72 72 1 0 0 0
*PART
$# title
P2
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
$ 3 1 72 72 1 0 0 0
*PART
$# title
Chevetre
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
$ 4 1 72 72 1 0 0 0
*PART
$# title
A_Chevetre_Long
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid

```

```

6      2      2      0      0      0      0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
Armature_6.35mm
$#  secid  elform  shrff  qr/irid  cst  scoor  nsm
      2      1  1.000000  2      1  0.000  0.000
$#  ts1  ts2  tt1  tt2  nsloc  ntloc
      6.350000  6.350000  0.000  0.000  0.000  0.000
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_TITLE
Armature 6.35mm_plastique cinematique
$#  mid  ro  e  pr  sigy  etan  beta
      2  7.8000E-9  2.0140E+5  0.300000  541.00000  852.00000  1.000000
$#  src  srp  fs  vp
      3200.0000  5.000000  0.000  0.000
*PART
$# title
A_P1_Long
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      7      2      2      0      0      0      0      0
*PART
$# title
A_P2_Long
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      8      2      2      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Ancrage_armature
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      9      3      3      0      0      0      0      0
*SECTION_DISCRETE_TITLE
Spring ancrage armature
$#  secid  dro  kd  v0  c1  fd
      3      0  0.000  0.000  0.000  0.000
$#  cdl  tdl
      0.000  0.000
*MAT_SPRING_NONLINEAR_ELASTIC_TITLE
Ancrage armature lisse
$#  mid  lcd  lcr
      3      4      0
*PART
$# title
A_Chevetre_Cadre
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      10     2      2      0      0      0      0      0
*PART
$# title
A_P1P2_Spir
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      11     2      2      0      0      0      0      0
*PART
$# title
SS_P1
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      12     1      1      0      1      0      0      0
*MAT_RIGID_TITLE
Rigide
$#  mid  ro  e  pr  n  couple  m  alias
      1  7.8000E-9  2.0000E+5  0.300000  0.000  0.000  0.000
$#  cmo  con1  con2
      1.000000  1  5
$#  lco  or  a1  a2  a3  v1  v2  v3
      0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
*PART
$# title
SS_P2
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      13     1      1      0      1      0      0      0
*PART
$# title
SS_ressorts
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      14     3      4      0      0      0      0      0
*MAT_SPRING_ELASTIC_TITLE
SuperStructure_Spring
$#  mid  k
      4  136.80000

```

```

*PART
$# title
Damper_SuperStructure
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      15        3        5        0        0        0        0        0
*MAT_DAMPER_VISCOUS_TITLE
SuperStructure_Dampèr
$#   mid      dc
      5 0.242600
*INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY
$#   pid      vx      vy      vz      vxr      vyr      vzr      icid
      12      0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0
      13      0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0
*DEFINE_CURVE_TITLE
Chargement
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      1        0 0.166667    0.025    0.000    0.000    0
$#
      a1      o1
      0.000      0.00
      0.005      0.01
      0.010      1334000
      0.015      1887000
      0.020      2311000
      0.025      2578000
      0.030      2669000
      0.035      2533000
      0.040      2148000
      0.045      1571000
      0.050      889600
      0.145      1334000
      0.163      8452000
      0.168      8918000
      0.173      9326000
      0.178      9623000
      0.185      9786000
      0.190      9702000
      0.195      9460000
      0.200      9091000
      0.207      8452000
      0.225      1334000
      0.250      0
      20.000      0
*DEFINE_CURVE_TITLE
Gravite_dynamic_relaxation
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      2        1 1.000000    1.000000    0.000    0.000    0
$#
      a1      o1
      0.000      0.000
      0.450000    1.000000
      100.000000    1.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Gravite
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      3        0 1.000000    1.000000    0.000    0.000    0
$#
      a1      o1
      0.000      1.000000
      1.000000e+010    1.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Armature lisse
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      4        0 1.000000    1.000000    0.000    0.000    0
$#
      a1      o1
      0.000      0.000
      0.350000    9857.0000
      1.000000    14293.000
      1.470000    15771.000
      3.100000    17070.000
      4.530000    17323.000
      4.540000      0.000
      1000.0000    0.000
*DEFINE_CURVE_TITLE
damping mass
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      5        0 1.000000    1.000000    0.000    0.000    0
$#
      a1      o1

```

```

0.000 1.000000
1.000000e+011 1.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Ascii
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
$# 6 0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$# al ol
0.000 0.100000
0.800000 0.100000
0.900000 0.001000
100.00000 0.001000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Mat_72R3
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
$# 723 0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$# al ol
-30000.000 10.900000
-300.00000 10.900000
-100.00000 7.530000
-30.000000 5.040000
-10.000000 3.500000
-3.000000 2.340000
-1.000000 1.620000
-0.100000 1.500000
-0.010000 1.380000
-0.001000 1.270000
-1.000000e-004 1.180000
-1.000000e-005 1.080000
-1.000000e-006 1.000000
0.000 1.000000
3.000000e-005 1.000000
1.000000e-004 1.030000
0.001000 1.110000
0.010000 1.180000
0.100000 1.260000
1.000000 1.350000
3.000000 1.390000
10.000000 1.440000
30.000000 1.480000
100.00000 2.220000
300.00000 3.200000
30000.000 3.200000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Mat_72R3_Statique
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
$# 724 0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$# al ol
-30.000000 1.000000
30.000000 1.000000
*SET_BEAM_TITLE
Jauges
$# sid
1
$# k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7 k8
210 265 529 474 468 1571 1165 1277
1723 2046 1653 936 4406 3242 0 0
*SET_NODE_LIST_TITLE
[...]
*SET_PART_LIST_TITLE
Gravite
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
1 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# pid1 pid2 pid3 pid4 pid5 pid6 pid7 pid8
1 2 3 4 6 7 8 10
11 0 0 0 0 0 0 0
*SET_PART_LIST_TITLE
Damping
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
2 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# pid1 pid2 pid3 pid4 pid5 pid6 pid7 pid8
1 2 3 4 6 7 8 10
11 12 13 0 0 0 0 0
*SET_PART_LIST_TITLE
ChargeAxiale
$# sid da1 da2 da3 da4 solver

```



```

      3      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#   pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
     12         13         0         0         0         0         0         0
*DAMPING_PART_MASS_SET
$#   psid      lcid      sf      flag
     2         5 4.270754      0
*DAMPING_PART_STIFFNESS_SET
$#   psid      coef
     2 3.7464E-5
*ELEMENT_SOLID
$#   eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
[...]
*ELEMENT_BEAM
$#   eid      pid      n1      n2      n3      rt1      rr1      rt2      rr2      local
[...]
*ELEMENT_DISCRETE
$#   eid      pid      n1      n2      vid      s      pf      offset
[...]
*ELEMENT_MASS
$#   eid      nid      mass      pid
[...]
*NODE
$#   nid      x      y      z      tc      rc
[...]
*END

```

B.3 Code LS-DYNA du modèle 2.2 simplifié

*KEYWORD

*TITLE

\$# title

File02_Impact_sur_le_chevetre

*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION

\$#	nrcyck	drtol	drfctr	drterm	tssfdr	irelal	edttl	idrflg
	250	1.0000E-6	0.995000	5.000000	0.000	0	0.040000	-1

*CONTROL_ENERGY

\$#	hgen	rwen	slnten	rylen
	2	2	1	2

*CONTROL_TERMINATION

\$#	endtim	endcyc	dtmin	endeng	endmas
	0.407300	0	0.000	0.000	0.000

*DATABASE_BNDOUT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	2	0	1

*DATABASE_ELOUT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	5.0000E-4	2	0	1

*DATABASE_GLSTAT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	2	0	1

*DATABASE_MATSUM

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	2	0	1

*DATABASE_NODOUT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt	dthf	binhf
	5.0000E-4	2	0	1	0.000	0

*DATABASE_RBDOUT

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	0.001000	2	0	1

*DATABASE_RCFORC

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	5.0000E-4	2	0	1

*DATABASE_SECFORC

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
	5.0000E-4	2	0	1

*DATABASE_BINARY_D3PLOT

\$#	dt	lcdt	beam	npltc	psetid
	0.050000	0	0	0	0

\$# ioopt
3

*DATABASE_CROSS_SECTION_SET_ID

\$#	csid							title
	1	Section1						
\$#	nsid	hsid	bsid	ssid	tsid	dsid	id	itype
	157	1	2	0	0	0	0	0

*DATABASE_CROSS_SECTION_SET_ID

\$#	csid							title
	2	Section2						
\$#	nsid	hsid	bsid	ssid	tsid	dsid	id	itype
	158	2	3	0	0	0	0	0

*DATABASE_HISTORY_BEAM_SET

\$#	id1	id2	id3	id4	id5	id6	id7	id8
	1	0	0	0	0	0	0	0

*DATABASE_HISTORY_NODE_SET

\$#	id1	id2	id3	id4	id5	id6	id7	id8
	2	1	155	3	0	0	0	0

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID

\$#	id							heading
	1	Chargement						
\$#	pid	dof	vad	lcid	sf	vid	death	birth
	28	2	2	1	1.000000	01.0000E+28	0.000	0.000

*BOUNDARY_SPC_SET_ID

\$#	id							heading
	1	Ancrage_Ressorts						
\$#	nsid	cid	dofx	dofy	dofz	dofrx	dofry	dofrz
	156	0	1	1	1	0	0	0

*SET_NODE_LIST_TITLE

\$#	sid	dal	da2	da3	da4	solver		
	156	0.000	0.000	0.000	0.000	MECH		
\$#	nid1	nid2	nid3	nid4	nid5	nid6	nid7	nid8

210797	210798	210799	210800	210801	210802	210803	210804
*LOAD_BODY_GENERALIZED_SET_PART							
\$#	psid	n2	lcid	drlcid	xc	yc	zc
	1	0	3	2	0.000	0.000	0.000
\$#	ax	ay	az	omx	omy	omz	cid
	0.000	0.000	9810.0000	0.000	0.000	0.000	0CENT
*LOAD_RIGID_BODY							
\$#	pid	dof	lcid	sf	cid	m1	m2
	26	3	2-52000.000		0	0	0
	26	3	3-52000.000		0	0	0
	27	3	2-52000.000		0	0	0
	27	3	3-52000.000		0	0	0
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	16	4	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	17	5	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	18	6	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	19	7	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	20	8	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	21	9	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	22	10	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	23	11	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	24	12	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	25	13	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	26	14	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	27	15	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	40	28	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	41	29	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	42	30	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	43	31	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	44	32	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	45	33	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	46	34	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	47	35	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_1D							
\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	48	36	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000

*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	49		37	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	50		38	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	51		39	3.175000	34.400002	4.700000	0.100000	0.500000
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	16		4	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	17		5	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	18		6	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	19		7	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	20		8	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	21		9	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	22		10	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	23		11	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	24		12	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	25		13	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	26		14	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	27		15	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	40		28	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	41		29	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	42		30	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	43		31	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	44		32	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	45		33	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	46		34	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	47		35	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	48		36	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6
*CONTACT_ID	\$#	nsids	nsidm	err	sigc	gb	smax	exp
	49		37	3.175000	34.400002	9.400000	0.100000	1.0000E-6

```

*CONTACT_ID
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
    50         38  3.175000 34.400002 9.400000 0.100000 1.0000E-6
*CONTACT_ID
$#  nsids      nsidm      err      sigc      gb      smax      exp
    51         39  3.175000 34.400002 9.400000 0.100000 1.0000E-6
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#  cid      title
    1P1_Semelle
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    1         5         0         0         0         0         0         0
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
    9999.0000  0.000  0.000  0.000 30.000000 0 0.0001.0000E+20
$#  sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
    1.000000  1.000000  0.000  0.000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
$#  option      nfls      sfls      param      eraten      erates      ct2cn      cn
    6  4.176000  0.820000  5.000000  0.000  0.000  0.000  0.000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#  cid      title
    2P1_Semelle
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    2         6         0         0         0         0         0         0
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
    9999.0000  0.000  0.000  0.000 30.000000 0 0.0001.0000E+20
$#  sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
    1.000000  1.000000  0.000  0.000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
$#  option      nfls      sfls      param      eraten      erates      ct2cn      cn
    6  4.176000  0.820000  5.000000  0.000  0.000  0.000  0.000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#  cid      title
    3P1_Chevetre
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    3         7         0         0         0         0         0         0
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
    9999.0000  0.000  0.000  0.000 30.000000 0 0.0001.0000E+20
$#  sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
    1.000000  1.000000  0.000  0.000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
$#  option      nfls      sfls      param      eraten      erates      ct2cn      cn
    6  4.176000  0.820000  5.000000  0.000  0.000  0.000  0.000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#  cid      title
    4P2_Chevetre
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    4         8         0         0         0         0         0         0
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
    9999.0000  0.000  0.000  0.000 30.000000 0 0.0001.0000E+20
$#  sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
    1.000000  1.000000  0.000  0.000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
$#  option      nfls      sfls      param      eraten      erates      ct2cn      cn
    6  4.176000  0.820000  5.000000  0.000  0.000  0.000  0.000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#  cid      title
    5PlaqueG_chevetre
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    11        13         0         0         0         0         0         0
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
    0.450000  0.000  0.000  0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#  sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
    1.000000  1.000000  0.000  0.000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#  cid      title
    6PlaqueD_chevetre
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    12        14         0         0         0         0         0         0
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
    0.450000  0.000  0.000  0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#  sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
    1.000000  1.000000  0.000  0.000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#  cid      title
    7Plancher
$#  ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
    15        24         0         0         0         0         0         0
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
    0.450000  0.000  0.000  0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20

```

```

$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      8plaque1_ancrage
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      16      25      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      9plaque2_ancrage
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      17      26      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      10plaque3_ancrage
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      18      27      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      11plaque4_ancrage
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      19      28      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      12plaque5_ancrage
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      20      29      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      13plaque6_ancrage
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      21      30      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      14plaque7_ancrage
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      22      31      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
      15plaque8_ancrage
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      23      32      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.450000 0.000 0.000 0.000 20.000000 0 0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID

```

```

$#      cid                                     title
      16PlaqueChargement
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      33          34          0          0          0          0          0          0
$#      fs          fd          dc          vc          vdc          penchk      bt          dt
9999.0000      0.000      0.000      0.000      0.000      20.000000      0          0.0001.0000E+20
$#      sfs          sfm          sst          mst          sfst          sfmt          fsf          vsf
1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
$#      option      nfls          sfls          param      eraten      erates      ct2cn      cn
      1          0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid                                     title
      17PlaqueAxialeP1
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      9          35          0          0          0          0          0          0
$#      fs          fd          dc          vc          vdc          penchk      bt          dt
0.450000      0.000      0.000      0.000      0.000      20.000000      0          0.0001.0000E+20
$#      sfs          sfm          sst          mst          sfst          sfmt          fsf          vsf
1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid                                     title
      18PlaqueAxialeP2
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      10         36          0          0          0          0          0          0
$#      fs          fd          dc          vc          vdc          penchk      bt          dt
0.450000      0.000      0.000      0.000      0.000      20.000000      0          0.0001.0000E+20
$#      sfs          sfm          sst          mst          sfst          sfmt          fsf          vsf
1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
*PART
$# title
Semelle1
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      1          1          72      72          1          0          0          0
*SECTION_SOLID_TITLE
Beton
$#      secid      elform      aet
      1          1          0
*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3
$#      mid      ro      pr
      72      2.3000E-9      0.190000
$#      ft          a0          a1          a2          b1          omega      alf
5.220000      9.911000      0.446300      0.002410      1.600000      0.500000      0.441700
$#      slambda      nout      edrop      rsize      ucf      lcrate      locwidth      npts
100.00000      2.000000      1.000000      0.039370      145.00000      723      25.400000      13.000000
$#      lambda1      lambda2      lambda3      lambda4      lambda5      lambda6      lambda7      lambda8
0.000      8.0000E-6      2.4000E-5      4.0000E-5      5.6000E-5      7.2000E-5      8.8000E-5      3.2000E-4
$#      lambda9      lambda10      lambda11      lambda12      lambda13      b3          a0y          a1y
5.2000E-4      5.7000E-4      1.000000      10.0000001.0000E+10      1.150000      7.484000      0.625000
$#      eta1          eta2          eta3          eta4          eta5          eta6          eta7          eta8
0.000      0.850000      0.970000      0.990000      1.000000      0.990000      0.970000      0.500000
$#      eta9          eta10         eta11         eta12         eta13         b2          a2f          a2y
0.100000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      1.350000      0.003528      0.007680
$-----EOS-8 CARDS-----
$ Generated EOS 8 (Tabulated Compaction)
*EOS_TABULATED_COMPACTIION
$#      eosid      gama      e0      vo
      72          0.000      0.000      1.000000
$#      ev1          ev2          ev3          ev4          ev5
      0.000      -0.001500      -0.004300      -0.010100      -0.030500
$#      ev6          ev7          ev8          ev9          ev10
-0.051300      -0.072600      -0.094300      -0.174000      -0.208000
$#      c1          c2          c3          c4          c5
      0.000      22.104767      48.188393      77.366684      146.99670
$#      c6          c7          c8          c9          c10
221.71080      314.55081      481.22079      2809.5159      4297.1665
$#      t1          t2          t3          t4          t5
0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      t6          t7          t8          t9          t10
0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      k1          k2          k3          k4          k5
14736.511      14736.511      14942.822      15694.385      18671.158
$#      k6          k7          k8          k9          k10
21662.672      24639.447      26894.133      60508.113      73682.555
*HOURLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc      qw

```



```

1          5  0.030000          1  1.500000  0.060000  0.100000  0.100000
*PART
$# title
P1
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          2          1          72          72          1          0          0          0
*PART
$# title
P2
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          3          1          72          72          1          0          0          0
*PART
$# title
Chevetre
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          4          1          72          72          1          0          0          0
*PART
$# title
A_Chevetre_Long
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          6          2          2          0          0          0          0          0
*SECTION_BEAM_TITLE
Armature_6.35mm
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor      nsm
          2          1      1.000000          2          1      0.000      0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
        6.350000      6.350000      0.000      0.000      0.000      0.000
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_TITLE
Armature 6.35mm_plastique cinematique
$#      mid      ro      e      pr      sigy      etan      beta
          2      7.8000E-9      2.0030E+5      0.300000      562.00000      1283.0000      1.000000
$#      src      srp      fs      vp
        3200.0000      5.000000      0.000      0.000
*PART
$# title
A_P1_Long
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          7          2          2          0          0          0          0          0
*PART
$# title
A_P2_Long
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          8          2          2          0          0          0          0          0
*PART
$# title
A_Chevetre_Cadre
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          10         2          2          0          0          0          0          0
*PART
$# title
A_P1P2_Spir
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          11         2          2          0          0          0          0          0
*PART
$# title
PlaquesG_chevetre
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          12         1          1          0          0          0          0          0
*MAT_RIGID_TITLE
Rigide_Plaques_Chevetres
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
          1      7.8000E-9      2.0000E+5      0.300000      0.000      0.000      0.000
$#      cmo      con1      con2
          0.000          0          0
$#      lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
          0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*PART
$# title
PlaqueD_Chevetre
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          13         1          1          0          0          0          0          0
*PART
$# title
Semelle_Elastique
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid

```

```

14      1      7      0      1      0      0      0
*MAT_ELASTIC_TITLE
Beton_Elastique
$#      mid      ro      e      pr      da      db      not used
      7 2.4000E-9 15400.000 0.200000 0.000 0.000 0
*PART
$# title
Plancher
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      15      1      6      0      0      0      0      0
*MAT_RIGID_TITLE
Rigide_Plancher
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
      6 7.8000E-9 2.0000E+5 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#      cmo      con1      con2
      1.000000      7
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*PART
$# title
Ancrage_Plaque1
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      16      1      5      0      0      0      0      0
*MAT_RIGID_TITLE
Rigide_Plaques_Ancrages
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
      5 7.8000E-9 2.0000E+5 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#      cmo      con1      con2
      1.000000      0      7
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*PART
$# title
Ancrage_Plaque2
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      17      1      5      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Ancrage_Plaque3
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      18      1      5      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Ancrage_Plaque4
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      19      1      5      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Ancrage_Plaque5
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      20      1      5      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Ancrage_Plaque6
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      21      1      5      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Ancrage_Plaque7
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      22      1      5      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Ancrage_Plaque8
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      23      1      5      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Tiges_ancrage
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      24      3      9      0      0      0      0      0
*SECTION_DISCRETE_TITLE
Spring_ancrage_armature
$#      secid      dro      kd      v0      c1      fd
      3      0      0.000      0.000      0.000      0.000

```

```

$#      cdl      tdl
      0.000      0.000
*MAT_SPRING_ELASTIC_TITLE
Tiges_ancrage
$#      mid      k
      9 1.8700E+5
*PART
$# title
Tiges_Chevetre
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      25      3      8      0      0      0      0      0
*MAT_SPRING_ELASTIC_TITLE
Tiges_Chevetre
$#      mid      k
      8 1.7300E+5
*PART
$# title
PlaqueAxialeP1
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      26      1      1      0      0      0      0      0
*PART
$# title
PlaqueAxialeP2
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      27      1      1      0      0      0      0      0
*PART
$# title
PlaqueChargement
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      28      1      1      0      0      0      0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
BeamDiscrete
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor      nsm
      4      6      1.000000      2      1      0.000      0.000
$#      vol      iner      cid      ca      offset      rrcon      srcon      trcon
      3200.0000 80.000000      0      0.000      0.000      0.000      0.000
*MAT_SPRING_ELASTIC_TITLE
SuperStructure_Spring
$#      mid      k
      4 136.80000
*MAT_GENERAL_NONLINEAR_6DOF_DISCRETE_BEAM_TITLE
Ancrage_Armature6.35mm
$#      mid      ro      kt      kr      unldopt      offset      dampf      iflag
      10 7.8000E-9      0.000      0.000      3 0.200000      0.000      0
$#      lcidtr      lcidts      lcidtt      lcidrr      lcidrs      lcidrt
      4      0      0      0      0      0
$#      lcidtur      lcidtus      lcidtut      lcidrur      lcidrus      lcidrut
      0      0      0      0      0      0
$#      lcidtdr      lcidtds      lcidtdt      lcidrdr      lcidrds      lcidrdt
      0      0      0      0      0      0
$#      lcidter      lcidtes      lcidtet      lcidrer      lcidres      lcidret
      0      0      0      0      0      0
$#      utfailr      utfails      utfailt      wtfailr      wtfails      wtfailt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      ucfailr      ucfails      ucfailt      wcfailr      wcfails      wcfailt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      iur      ius      iut      iwr      iws      iwt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Chargement
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      1      0      1.000000      1.000000      0.000      0.000      0
$#
      al      ol
      0.000      0.000
      0.001000      0.012400
      0.002000      0.053500
      0.002900      0.136300
      0.003900      0.243600
      0.004900      0.375100
      0.005900      0.544800
      0.006800      0.749700
      0.007800      0.997600
      0.008800      1.279500
      0.009800      1.578000
      0.010700      1.888500

```

0.011700	2.217400
0.012700	2.573100
0.013700	2.938200
0.014600	3.286200
0.015600	3.608600
0.016600	3.906000
0.017600	4.180800
0.018600	4.462500
0.019500	4.702400
0.020500	4.959100
0.021500	5.218400
0.022500	5.465400
0.023400	5.735500
0.024400	6.028400
0.025400	6.329500
0.026400	6.686800
0.027300	7.091200
0.028300	7.507400
0.029300	7.987000
0.030300	8.498000
0.031300	9.023000
0.032200	9.616300
0.033200	10.260200
0.034200	10.890100
0.035200	11.581300
0.036100	12.271600
0.037100	12.993900
0.038100	13.717400
0.039100	14.437200
0.040000	15.170200
0.041000	15.899500
0.042000	16.590799
0.043000	17.296499
0.043900	17.949699
0.044900	18.580400
0.045900	19.229700
0.046900	19.848000
0.047900	20.434099
0.048800	21.027201
0.049800	21.636000
0.050800	22.261801
0.051800	22.893101
0.052700	23.525801
0.053700	24.207500
0.054700	24.896500
0.055700	25.566299
0.056600	26.208700
0.057600	26.931999
0.058600	27.606400
0.059600	28.260599
0.060500	28.929199
0.061500	29.619900
0.062500	30.332199
0.063500	31.031700
0.064500	31.727100
0.065400	32.404701
0.066400	33.120602
0.067400	33.800201
0.068400	34.511299
0.069300	35.205002
0.070300	35.908699
0.071300	36.588100
0.072300	37.262901
0.073200	37.886600
0.074200	38.449600
0.075200	38.866901
0.076200	39.033401
0.077100	38.997799
0.078100	38.775501
0.079100	38.361099
0.080100	37.795502
0.081100	37.079399
0.082000	36.292400
0.083000	35.444599
0.084000	34.583401

0.085000	33.695301
0.085900	32.824402
0.086900	31.994600
0.087900	31.221800
0.088900	30.502600
0.089800	29.832701
0.090800	29.248699
0.091800	28.741301
0.092800	28.311899
0.093700	27.925900
0.094700	27.627600
0.095700	27.377899
0.096700	27.143299
0.097700	26.903400
0.098600	26.636700
0.099600	26.382099
0.100600	26.083599
0.101600	25.717400
0.102500	25.209801
0.103500	24.490400
0.104500	23.712400
0.105500	22.957001
0.106400	22.195000
0.107400	21.417601
0.108400	20.662001
0.109400	19.947399
0.110400	19.194500
0.111300	18.413500
0.112300	17.707701
0.113300	16.977699
0.114300	16.249201
0.115200	15.504900
0.116200	14.807100
0.117200	14.170900
0.118200	13.595900
0.119100	13.015300
0.120100	12.411500
0.121100	11.786700
0.122100	11.104000
0.123000	10.476600
0.124000	9.827900
0.125000	9.139500
0.126000	8.462100
0.127000	7.763500
0.127900	7.107100
0.128900	6.443900
0.129900	5.756100
0.130900	5.021400
0.131800	4.246100
0.132800	3.496300
0.133800	2.682500
0.134800	1.860700
0.135700	1.048000
0.136700	0.256600
0.137700	-0.494000
0.138700	-1.202500
0.139600	-1.886500
0.140600	-2.533000
0.141600	-3.162500
0.142600	-3.756000
0.143600	-4.316900
0.144500	-4.890400
0.145500	-5.445200
0.146500	-5.999700
0.147500	-6.559100
0.148400	-7.118700
0.149400	-7.709200
0.150400	-8.336200
0.151400	-8.966000
0.152300	-9.612400
0.153300	-10.280700
0.154300	-10.974300
0.155300	-11.644700
0.156300	-12.292000
0.157200	-12.969100

0.158200	-13.599100
0.159200	-14.182100
0.160200	-14.708500
0.161100	-15.269100
0.162100	-15.773400
0.163100	-16.193899
0.164100	-16.537001
0.165000	-16.834499
0.166000	-17.113300
0.167000	-17.372900
0.168000	-17.564699
0.168900	-17.721201
0.169900	-17.836599
0.170900	-17.909901
0.171900	-17.938900
0.172900	-17.930700
0.173800	-17.875500
0.174800	-17.770399
0.175800	-17.620600
0.176800	-17.433901
0.177700	-17.174101
0.178700	-16.883400
0.179700	-16.601801
0.180700	-16.301001
0.181600	-15.957700
0.182600	-15.549400
0.183600	-15.082500
0.184600	-14.639800
0.185500	-14.294200
0.186500	-13.991600
0.187500	-13.682900
0.188500	-13.388900
0.189500	-13.166300
0.190400	-13.033700
0.191400	-12.932000
0.192400	-12.797800
0.193400	-12.647400
0.194300	-12.498000
0.195300	-12.310300
0.196300	-12.092800
0.197300	-11.856700
0.198200	-11.603100
0.199200	-11.264500
0.200200	-10.841600
0.201200	-10.381400
0.202100	-9.876600
0.203100	-9.327900
0.204100	-8.758500
0.205100	-8.178400
0.206100	-7.575500
0.207000	-7.009500
0.208000	-6.472000
0.209000	-5.952000
0.210000	-5.466500
0.210900	-4.994600
0.211900	-4.506800
0.212900	-4.044500
0.213900	-3.608500
0.214800	-3.175500
0.215800	-2.730800
0.216800	-2.266300
0.217800	-1.765700
0.218800	-1.228000
0.219700	-0.662800
0.220700	-0.052100
0.221700	0.571200
0.222700	1.216300
0.223600	1.843200
0.224600	2.466800
0.225600	3.072100
0.226600	3.603700
0.227500	4.035700
0.228500	4.449600
0.229500	4.872600
0.230500	5.253700

0.231400	5.575300
0.232400	5.876700
0.233400	6.180400
0.234400	6.471000
0.235400	6.792400
0.236300	7.116900
0.237300	7.451800
0.238300	7.823400
0.239300	8.218900
0.240200	8.577900
0.241200	8.938500
0.242200	9.283600
0.243200	9.610400
0.244100	9.885400
0.245100	10.100000
0.246100	10.286000
0.247100	10.450000
0.248000	10.586000
0.249000	10.701000
0.250000	10.808000
0.251000	10.917000
0.252000	11.021000
0.252900	11.141000
0.253900	11.276000
0.254900	11.431000
0.255900	11.586000
0.256800	11.721000
0.257800	11.882000
0.258800	12.040000
0.259800	12.177000
0.260700	12.293000
0.261700	12.360000
0.262700	12.393000
0.263700	12.398000
0.264600	12.360000
0.265600	12.287000
0.266600	12.184000
0.267600	12.074000
0.268600	11.974000
0.269500	11.852000
0.270500	11.728000
0.271500	11.622000
0.272500	11.514000
0.273400	11.397000
0.274400	11.271000
0.275400	11.135000
0.276400	10.992000
0.277300	10.856000
0.278300	10.731000
0.279300	10.616000
0.280300	10.495000
0.281300	10.349000
0.282200	10.185000
0.283200	10.020000
0.284200	9.849200
0.285200	9.659200
0.286100	9.439200
0.287100	9.244900
0.288100	9.066500
0.289100	8.868200
0.290000	8.676000
0.291000	8.490100
0.292000	8.292200
0.293000	8.064000
0.293900	7.806500
0.294900	7.560700
0.295900	7.316600
0.296900	7.078100
0.297900	6.825200
0.298800	6.561400
0.299800	6.305500
0.300800	6.042700
0.301800	5.769400
0.302700	5.503000
0.303700	5.226700

0.304700	4.927000
0.305700	4.626000
0.306600	4.320100
0.307600	4.047200
0.308600	3.775700
0.309600	3.477900
0.310500	3.186400
0.311500	2.882500
0.312500	2.576200
0.313500	2.272400
0.314500	1.984800
0.315400	1.723600
0.316400	1.473300
0.317400	1.215100
0.318400	0.965300
0.319300	0.728300
0.320300	0.507700
0.321300	0.296900
0.322300	0.073300
0.323200	-0.161300
0.324200	-0.408600
0.325200	-0.664200
0.326200	-0.938000
0.327100	-1.206500
0.328100	-1.473900
0.329100	-1.746600
0.330100	-2.022400
0.331100	-2.275200
0.332000	-2.500600
0.333000	-2.716300
0.334000	-2.933800
0.335000	-3.156600
0.335900	-3.341200
0.336900	-3.512400
0.337900	-3.705400
0.338900	-3.868700
0.339800	-4.013600
0.340800	-4.168500
0.341800	-4.313300
0.342800	-4.446600
0.343800	-4.587700
0.344700	-4.719700
0.345700	-4.849100
0.346700	-4.981500
0.347700	-5.103300
0.348600	-5.216400
0.349600	-5.321500
0.350600	-5.421100
0.351600	-5.503000
0.352500	-5.578800
0.353500	-5.653300
0.354500	-5.720900
0.355500	-5.775400
0.356400	-5.816600
0.357400	-5.847800
0.358400	-5.870900
0.359400	-5.889600
0.360400	-5.901400
0.361300	-5.908800
0.362300	-5.919000
0.363300	-5.920300
0.364300	-5.908200
0.365200	-5.890100
0.366200	-5.872500
0.367200	-5.858700
0.368200	-5.842800
0.369100	-5.815100
0.370100	-5.782800
0.371100	-5.744400
0.372100	-5.686800
0.373000	-5.607900
0.374000	-5.513900
0.375000	-5.411200
0.376000	-5.295900
0.377000	-5.161900

0.377900	-5.016100
0.378900	-4.857500
0.379900	-4.707700
0.380900	-4.552800
0.381800	-4.389400
0.382800	-4.224900
0.383800	-4.035500
0.384800	-3.862500
0.385700	-3.686500
0.386700	-3.491500
0.387700	-3.341500
0.388700	-3.209800
0.389600	-3.064400
0.390600	-2.918000
0.391600	-2.794200
0.392600	-2.667700
0.393600	-2.513900
0.394500	-2.356600
0.395500	-2.180000
0.396500	-2.017000
0.397500	-1.846500
0.398400	-1.644700
0.399400	-1.479000
0.400400	-1.325800
0.401400	-1.162300
0.402300	-1.000400
0.403300	-0.820800
0.404300	-0.624100
0.405300	-0.428700
0.406300	-0.215100
0.407300	0.000
0.423967	0.618034
0.440633	1.175571
0.457300	1.618034
0.473967	1.902113
0.490633	2.000000
0.507300	1.902113
0.523967	1.618034
0.540633	1.175571
0.557300	0.618034
0.573967	0.000
0.590633	-0.618034
0.607300	-1.175571
0.623967	-1.618034
0.640633	-1.902113
0.657300	-2.000000
0.673967	-1.902113
0.690633	-1.618034
0.707300	-1.175571
0.723967	-0.618034
0.740633	0.000
0.757300	0.618034
0.773967	1.175571
0.790633	1.618034
0.807300	1.902113
0.823967	2.000000
0.840633	1.902113
0.857300	1.618034
0.873967	1.175571
0.890633	0.618034
0.907300	0.000
0.923967	-0.618034
0.940633	-1.175571
0.957300	-1.618034
0.973967	-1.902113
0.990633	-2.000000
1.007300	-1.902113
1.023967	-1.618034
1.040633	-1.175571
1.057300	-0.618034
1.073967	0.000
1.090633	0.618034
1.107300	1.175571
1.123967	1.618034
1.140633	1.902113

1.157300	2.000000
1.173967	1.902113
1.190633	1.618034
1.207300	1.175571
1.223967	0.618034
1.240633	0.000
1.257300	-0.618034
1.273967	-1.175571
1.290633	-1.618034
1.307300	-1.902113
1.323967	-2.000000
1.340633	-1.902113
1.357300	-1.618034
1.373967	-1.175571
1.390633	-0.618034
1.407300	0.000
1.419800	0.618034
1.432300	1.175571
1.444800	1.618034
1.457300	1.902113
1.469800	2.000000
1.482300	1.902113
1.494800	1.618034
1.507300	1.175571
1.519800	0.618034
1.532300	0.000
1.544800	-0.618034
1.557300	-1.175571
1.569800	-1.618034
1.582300	-1.902113
1.594800	-2.000000
1.607300	-1.902113
1.619800	-1.618034
1.632300	-1.175571
1.644800	-0.618034
1.657300	0.000
1.669800	0.618034
1.682300	1.175571
1.694800	1.618034
1.707300	1.902113
1.719800	2.000000
1.732300	1.902113
1.744800	1.618034
1.757300	1.175571
1.769800	0.618034
1.782300	0.000
1.794800	-0.618034
1.807300	-1.175571
1.819800	-1.618034
1.832300	-1.902113
1.844800	-2.000000
1.857300	-1.902113
1.869800	-1.618034
1.882300	-1.175571
1.894800	-0.618034
1.907300	0.000
1.919800	0.618034
1.932300	1.175571
1.944800	1.618034
1.957300	1.902113
1.969800	2.000000
1.982300	1.902113
1.994800	1.618034
2.007300	1.175571
2.019800	0.618034
2.032300	0.000
2.044800	-0.618034
2.057300	-1.175571
2.069800	-1.618034
2.082300	-1.902113
2.094800	-2.000000
2.107300	-1.902113
2.119800	-1.618034
2.132300	-1.175571
2.144800	-0.618034

2.157300				0.000			
2.169800				0.618034			
2.182300				1.175571			
2.194800				1.618034			
2.207300				1.902113			
2.219800				2.000000			
2.232300				1.902113			
2.244800				1.618034			
2.257300				1.175571			
2.269800				0.618034			
2.282300				0.000			
2.294800				-0.618034			
2.307300				-1.175571			
2.319800				-1.618034			
2.332300				-1.902113			
2.344800				-2.000000			
2.357300				-1.902113			
2.369800				-1.618034			
2.382300				-1.175571			
2.394800				-0.618034			
2.407300				0.000			
*DEFINE_CURVE_TITLE							
Chargement_DR							
\$#	lcid	sidr	sfa	sfo	offa	offo	dattyp
	2	1	1.000000	1.000000	0.000	0.000	0
\$#		al		ol			
		0.000		0.000			
		0.100000		1.000000			
		100.00000		1.000000			
*DEFINE_CURVE_TITLE							
f(t)=1							
\$#	lcid	sidr	sfa	sfo	offa	offo	dattyp
	3	0	1.000000	1.000000	0.000	0.000	0
\$#		al		ol			
		0.000		1.000000			
		1.000000e+010		1.000000			
*DEFINE_CURVE_TITLE							
Armature lisse_ancrage							
\$#	lcid	sidr	sfa	sfo	offa	offo	dattyp
	4	0	1.000000	1.000000	0.000	0.000	0
\$#		al		ol			
		-75.000000		-4275.0000			
		-10.000000		-4275.0000			
		-2.600000		-13681.000			
		-2.500000		-17101.000			
		-2.375000		-16754.000			
		-2.250000		-16396.000			
		-2.125000		-16025.000			
		-2.000000		-15641.000			
		-1.875000		-15243.000			
		-1.750000		-14828.000			
		-1.625000		-14395.000			
		-1.500000		-13941.000			
		-1.375000		-13464.000			
		-1.250000		-12960.000			
		-1.125000		-12426.000			
		-1.000000		-11854.000			
		-0.875000		-11237.000			
		-0.750000		-10565.000			
		-0.625000		-9822.0000			
		-0.500000		-8983.0000			
		-0.375000		-8007.0000			
		-0.250000		-6808.0000			
		-0.125000		-5160.0000			
		0.000		0.000			
		0.125000		5160.0000			
		0.250000		6808.0000			
		0.375000		8007.0000			
		0.500000		8983.0000			
		0.625000		9822.0000			
		0.750000		10565.000			
		0.875000		11237.000			
		1.000000		11854.000			
		1.125000		12426.000			
		1.250000		12960.000			

1.375000	13464.000
1.500000	13941.000
1.625000	14395.000
1.750000	14828.000
1.875000	15243.000
2.000000	15641.000
2.125000	16025.000
2.250000	16396.000
2.375000	16754.000
2.500000	17101.000
2.600000	13681.000
10.000000	0.000
75.000000	0.000

```

*DEFINE_CURVE_TITLE
MassDamping_DR
$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
      5     1  1.000000  1.000000  0.000  0.000  0
$#           al           ol
      0.000           0.000
      0.050000       10.000000
      0.900000       10.000000
      0.950000       1.000000
      1000.0000      1.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Mat_72R3
$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
      723   0  1.000000  1.000000  0.000  0.000  0
$#           al           ol
     -30000.000       10.900000
     -300.00000       10.900000
     -100.00000       7.530000
     -30.000000       5.040000
     -10.000000       3.500000
     -3.000000       2.340000
     -1.000000       1.620000
     -0.100000       1.500000
     -0.010000       1.380000
     -0.001000       1.270000
     -1.000000e-004  1.180000
     -1.000000e-005  1.080000
     -1.000000e-006  1.000000
      0.000           1.000000
     3.000000e-005   1.000000
     1.000000e-004   1.030000
      0.001000       1.110000
      0.010000       1.180000
      0.100000       1.260000
      1.000000       1.350000
      3.000000       1.390000
     10.000000       1.440000
     30.000000       1.480000
    100.000000       2.220000
    300.000000       3.200000
   30000.000       3.200000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Mat_72R3_Statique
$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
      724   0  1.000000  1.000000  0.000  0.000  0
$#           al           ol
     -30.000000       1.000000
     30.000000       1.000000
*SET_BEAM_TITLE
[...]
*SET_NODE_LIST_TITLE
[...]
*SET_PART_LIST_TITLE
Gravite
$#   sid   da1   da2   da3   da4   solver
      1   0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#   pid1  pid2  pid3  pid4  pid5  pid6  pid7  pid8
      1    2    3    4    6    7    8    10
      11   12   13   14    0    0    0    0
*SET_PART_LIST_TITLE
Damping
$#   sid   da1   da2   da3   da4   solver

```

```

      2      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#  pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
      6      7      8      10      11      14      0      0
*DAMPING_PART_MASS_SET
$#  psid      lcid      sf      flag
      2      3      0.996960      0
*DAMPING_PART_MASS_SET
$#  psid      lcid      sf      flag
      2      5      0.996960      0
*DAMPING_PART_STIFFNESS_SET
$#  psid      coef
      2      0.02
*ELEMENT_SOLID
$#  eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
[...]
*ELEMENT_BEAM
$#  eid      pid      n1      n2      n3      rt1      rr1      rt2      rr2      local
[...]
*ELEMENT_DISCRETE
$#  eid      pid      n1      n2      vid      s      pf      offset
      156739      24      210797      206850      0      0.000      0      0.107000
      156740      24      210798      207050      0      0.000      0      0.107000
      156741      24      210800      206900      0      0.000      0      0.107000
      156742      24      210799      207100      0      0.000      0      0.107000
      156743      24      210802      206950      0      0.000      0      0.107000
      156744      24      210801      207150      0      0.000      0      0.107000
      156745      24      210804      207000      0      0.000      0      0.107000
      156746      24      210803      207200      0      0.000      0      0.107000
      156747      25      210312      210260      0      0.000      0      0.145000
      156748      25      210140      210116      0      0.000      0      0.145000
*ELEMENT_MASS
$#  eid      nid      mass      pid
      1      210797      0.010000      0
      2      210798      0.010000      0
      3      210799      0.010000      0
      4      210800      0.010000      0
      5      210801      0.010000      0
      6      210802      0.010000      0
      7      210803      0.010000      0
      8      210804      0.010000      0
      21      211353      0.040300      0
      22      211341      0.040300      0
      23      211159      0.040300      0
      24      211163      0.040300      0
      25      132171      0.103000      0
      26      132389      0.103000      0
*NODE
$#  nid      x      y      z      tc      rc
[...]
*END

```


ANNEXE C

COMPLÉMENT DU CHAPITRE 6 : RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSULTATS

C.1 Essai quasi-statique (modèle 1 et essai 1)

C.1.1 Graphiques des résultats des jauges des armatures

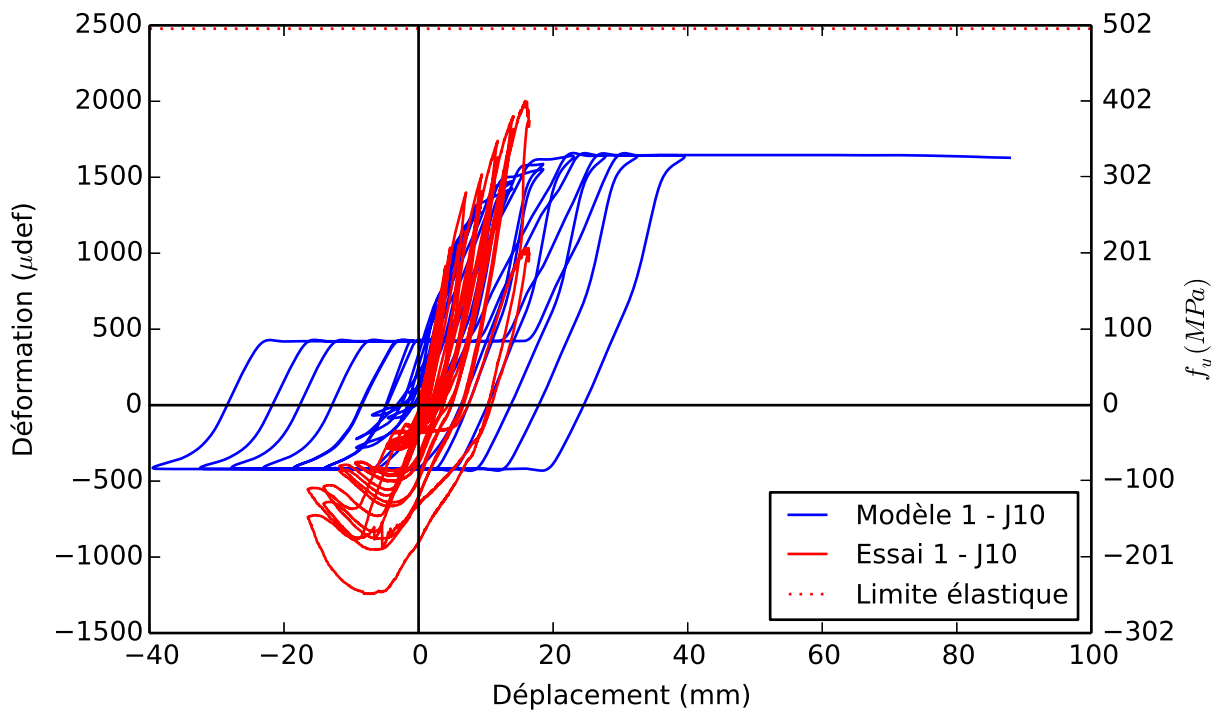


Figure C.1 Graphique des résultats de la jauge 10

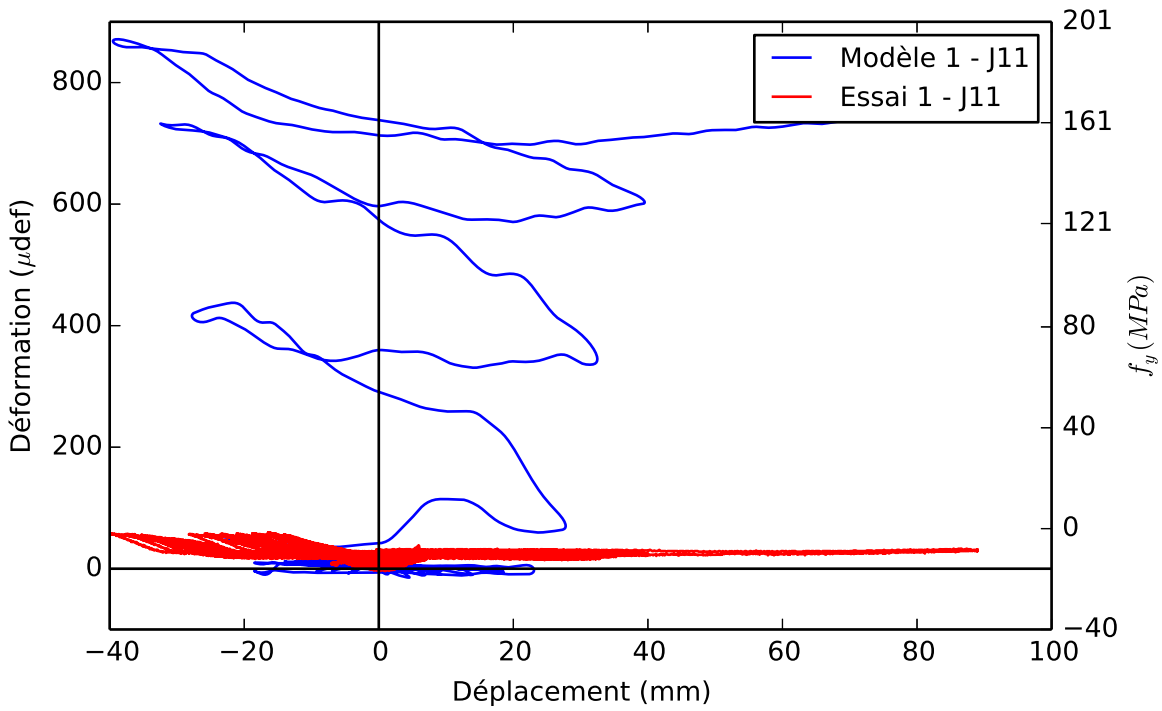


Figure C.2 Graphique des résultats de la jauge 11

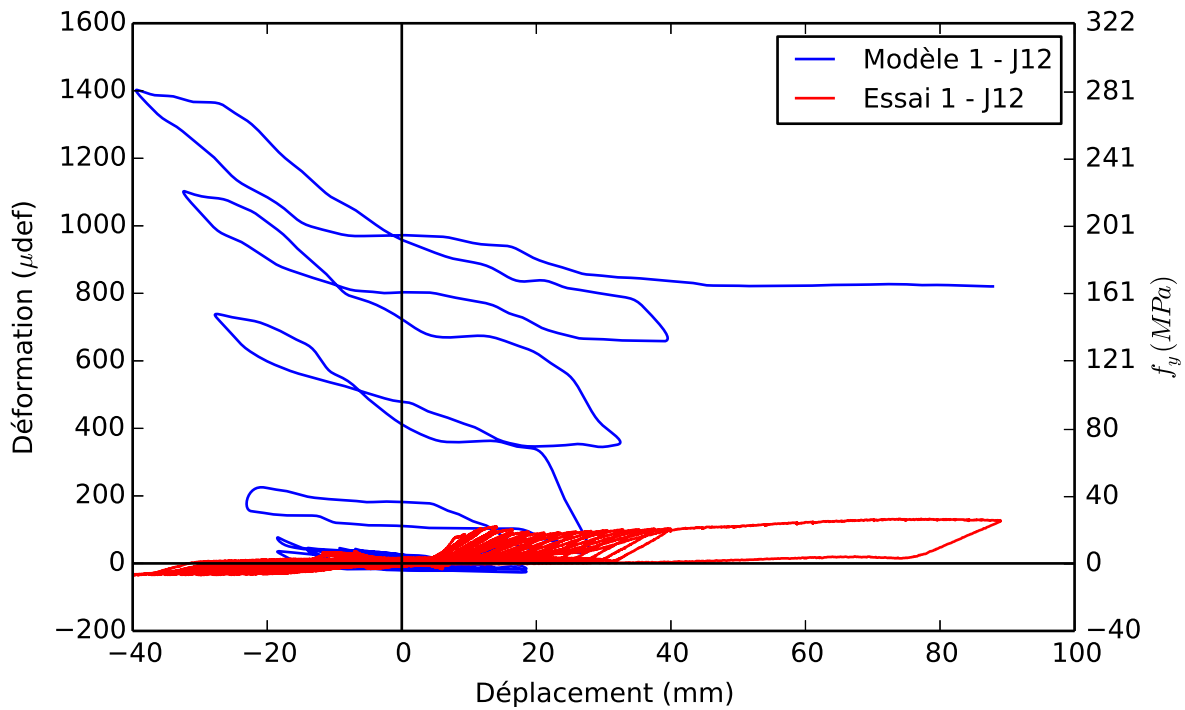


Figure C.3 Graphique des résultats de la jauge 12

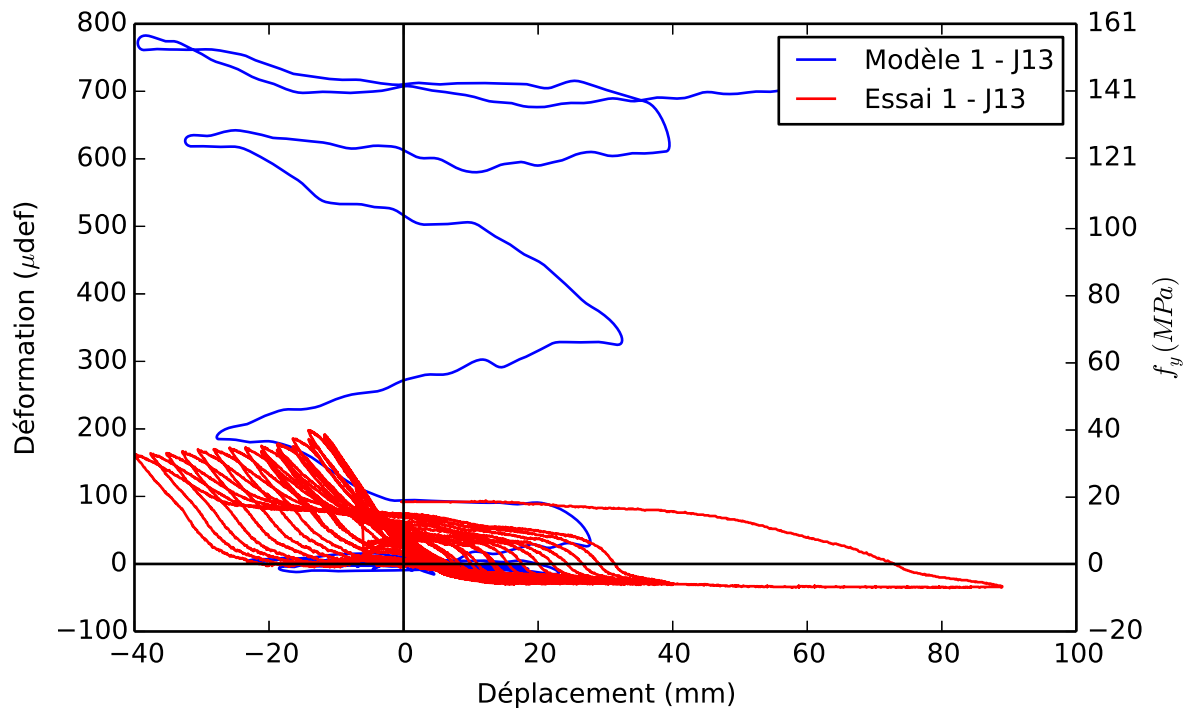


Figure C.4 Graphique des résultats de la jauge 13

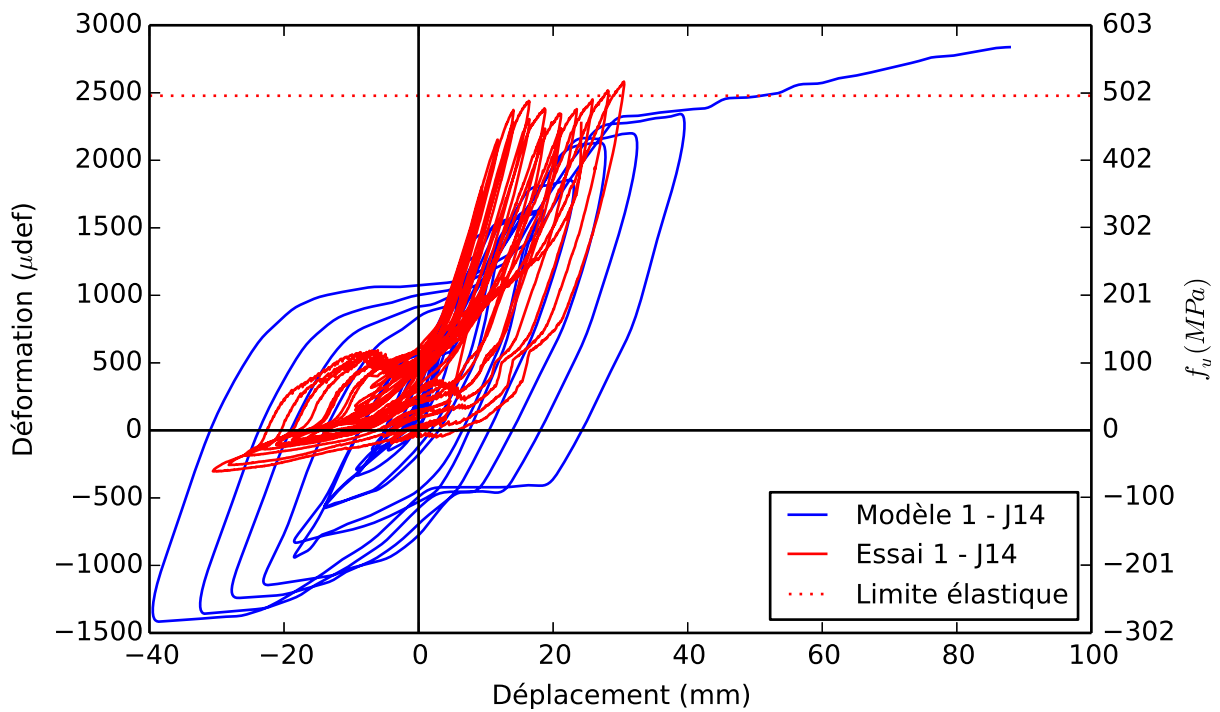


Figure C.5 Graphique des résultats de la jauge 14

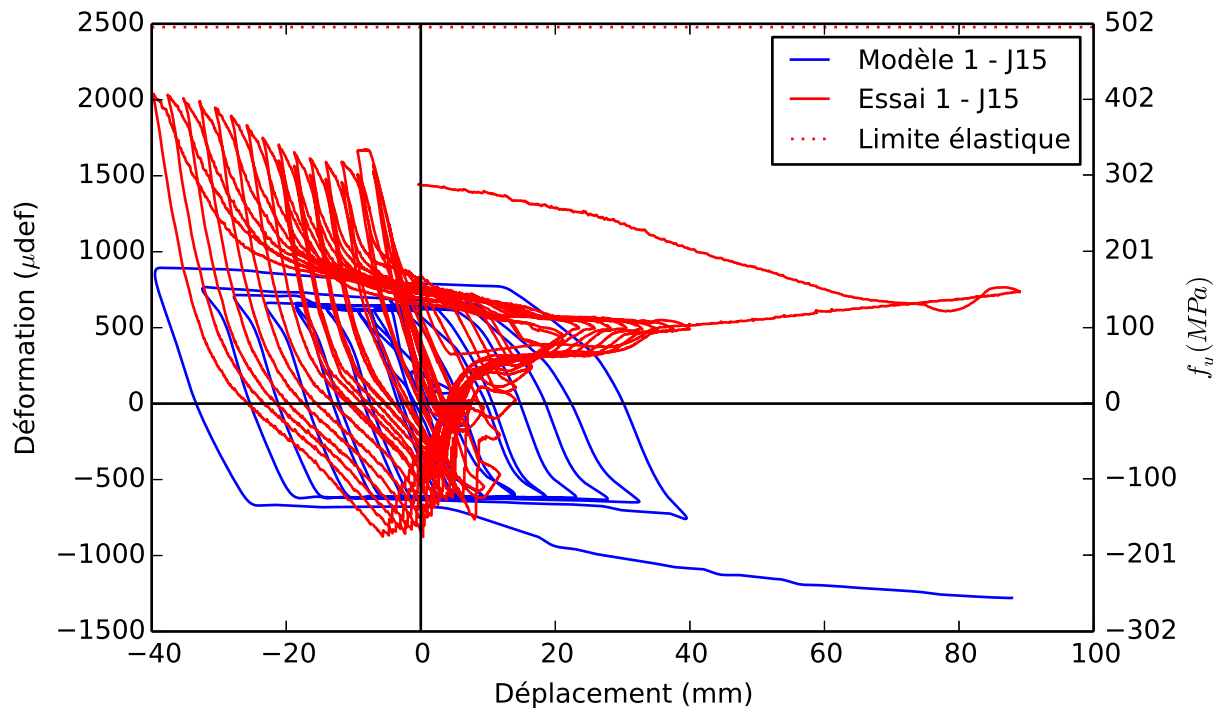


Figure C.6 Graphique des résultats de la jauge 15

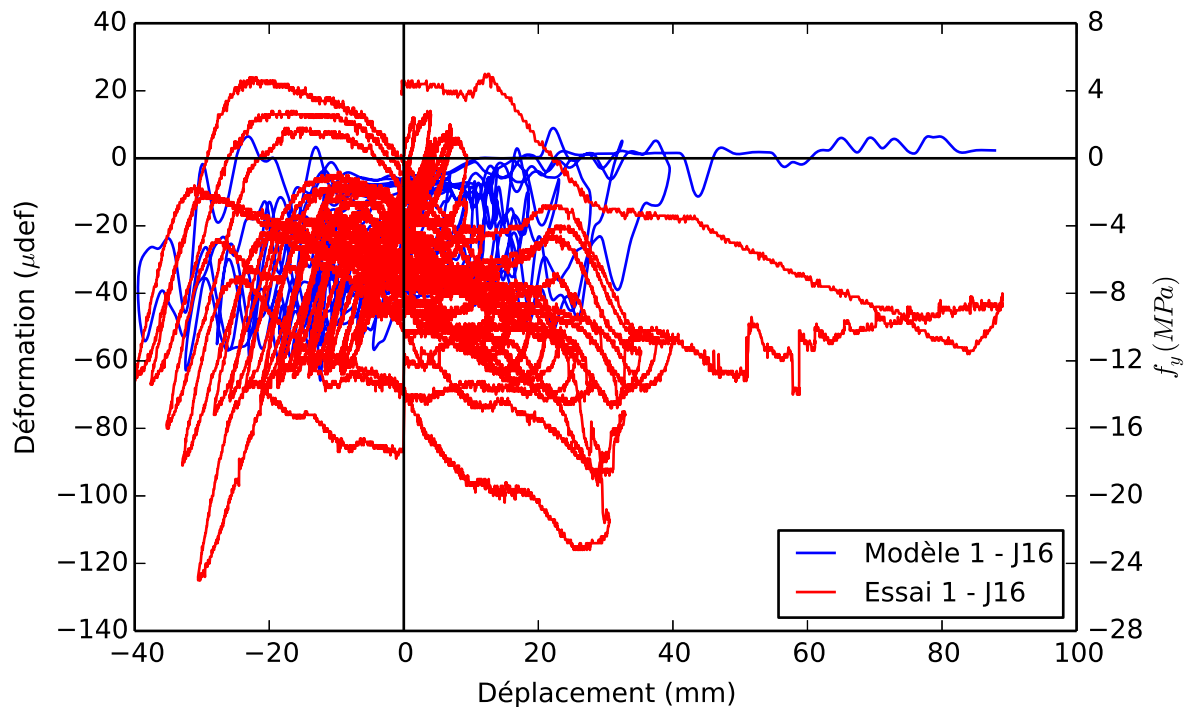


Figure C.7 Graphique des résultats de la jauge 16

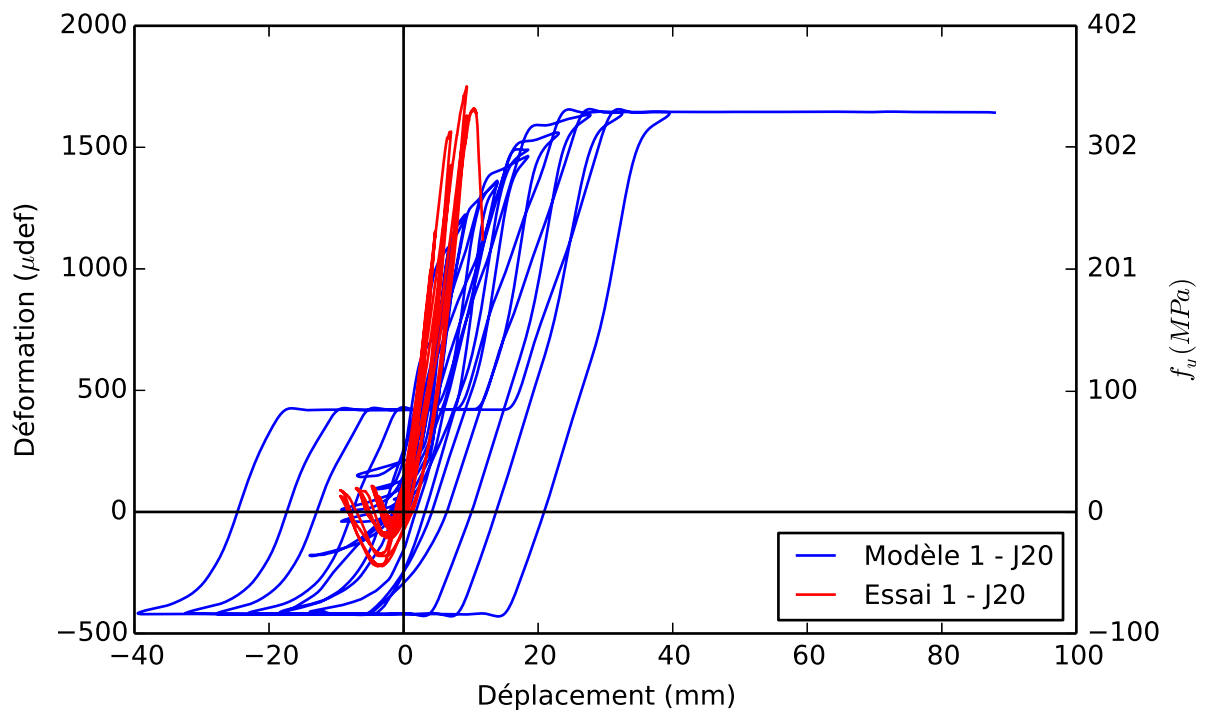


Figure C.8 Graphique des résultats de la jauge 20

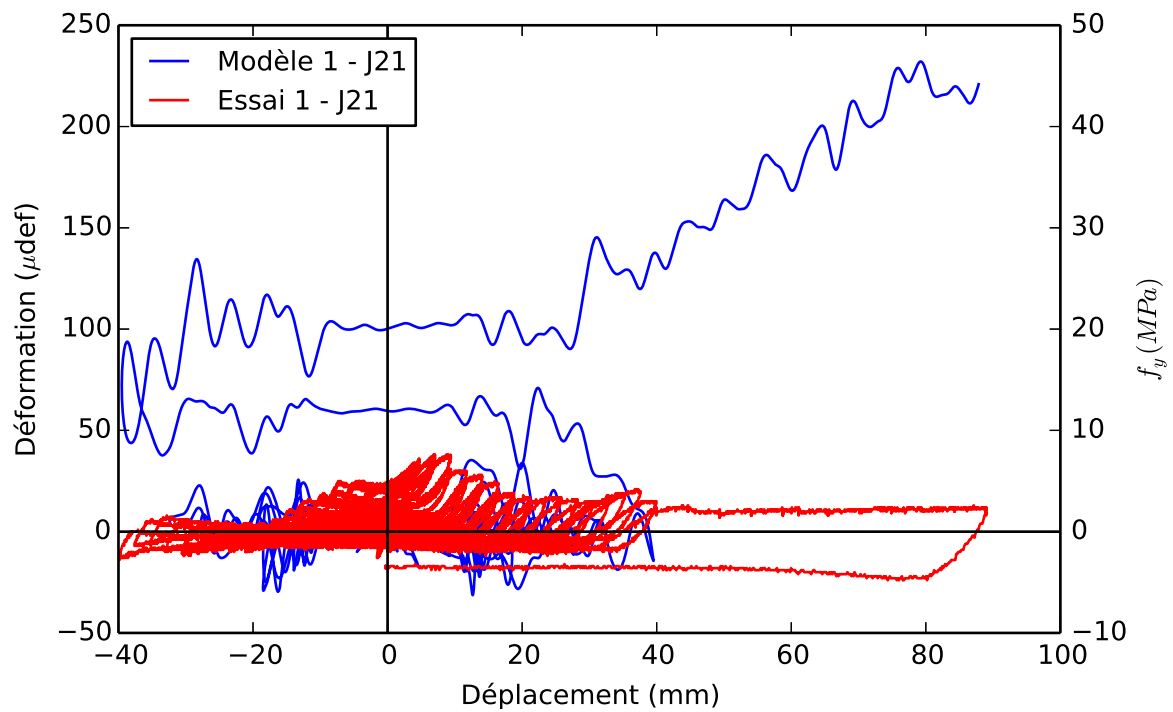


Figure C.9 Graphique des résultats de la jauge 21

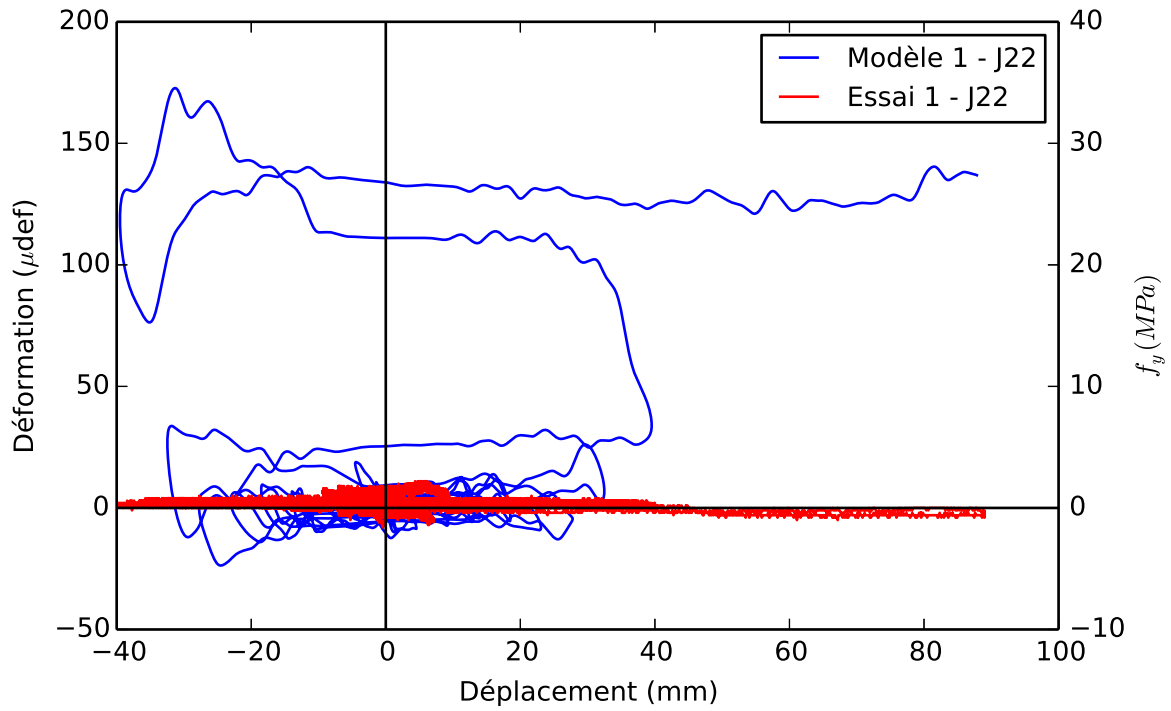


Figure C.10 Graphique des résultats de la jauge 22

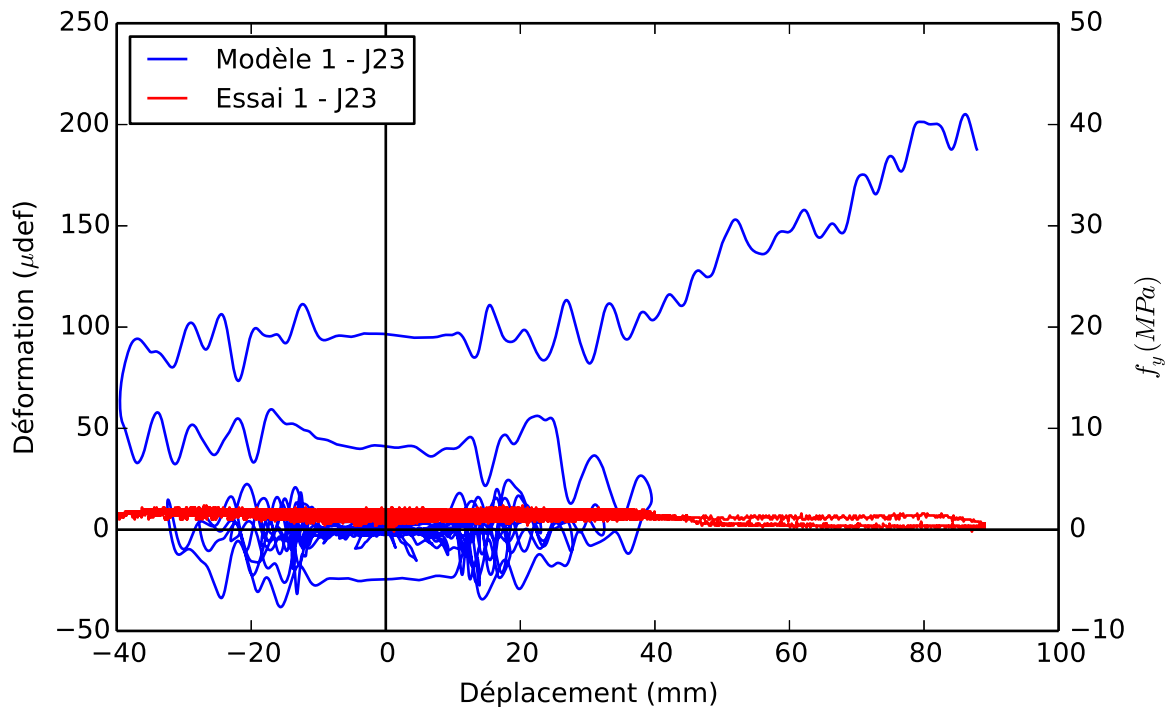


Figure C.11 Graphique des résultats de la jauge 23

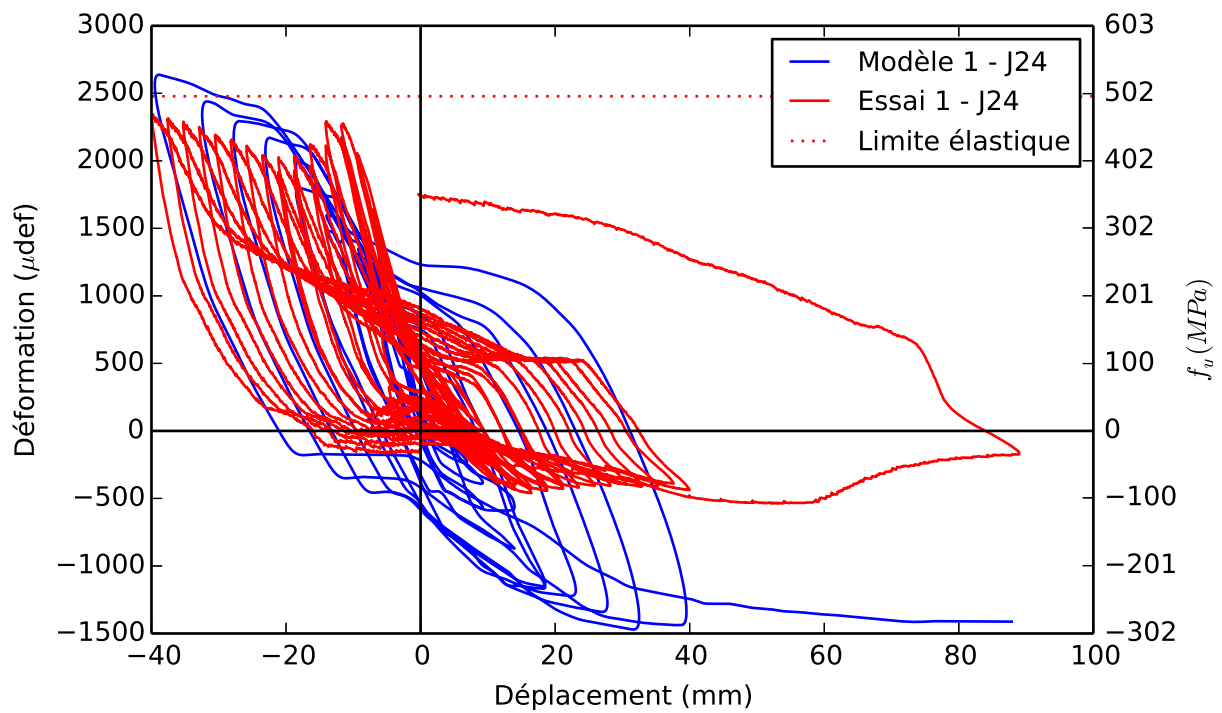


Figure C.12 Graphique des résultats de la jauge 24

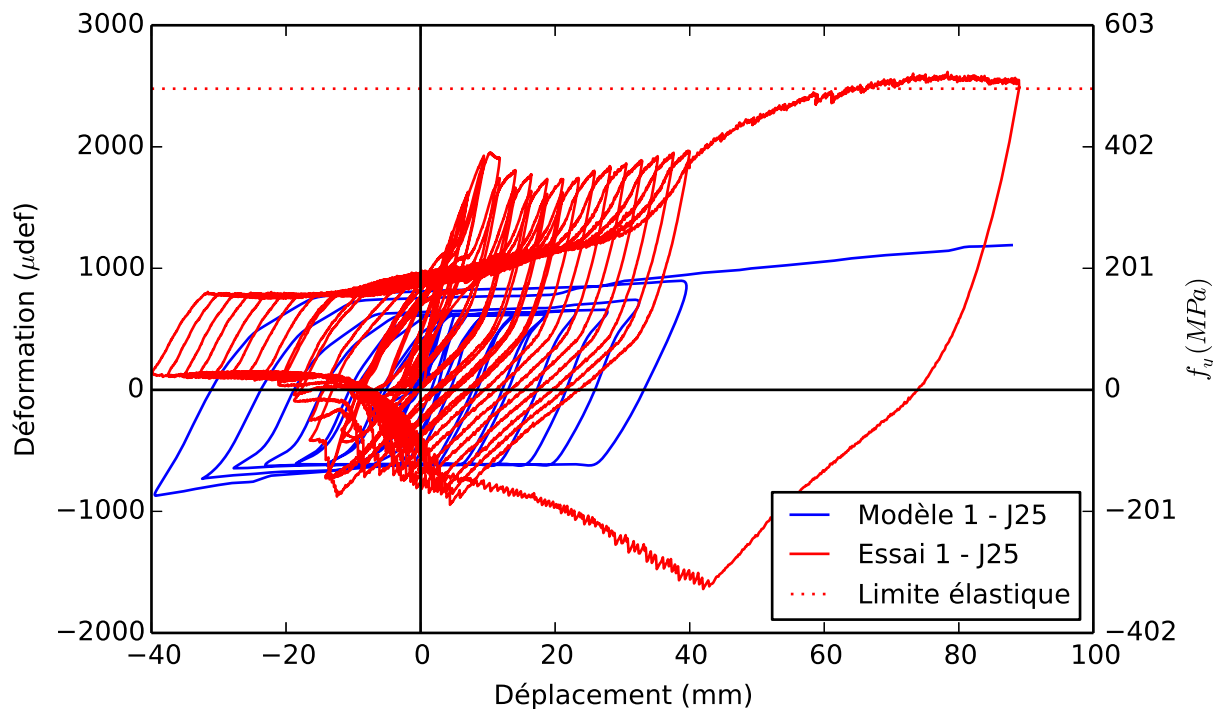


Figure C.13 Graphique des résultats de la jauge 25

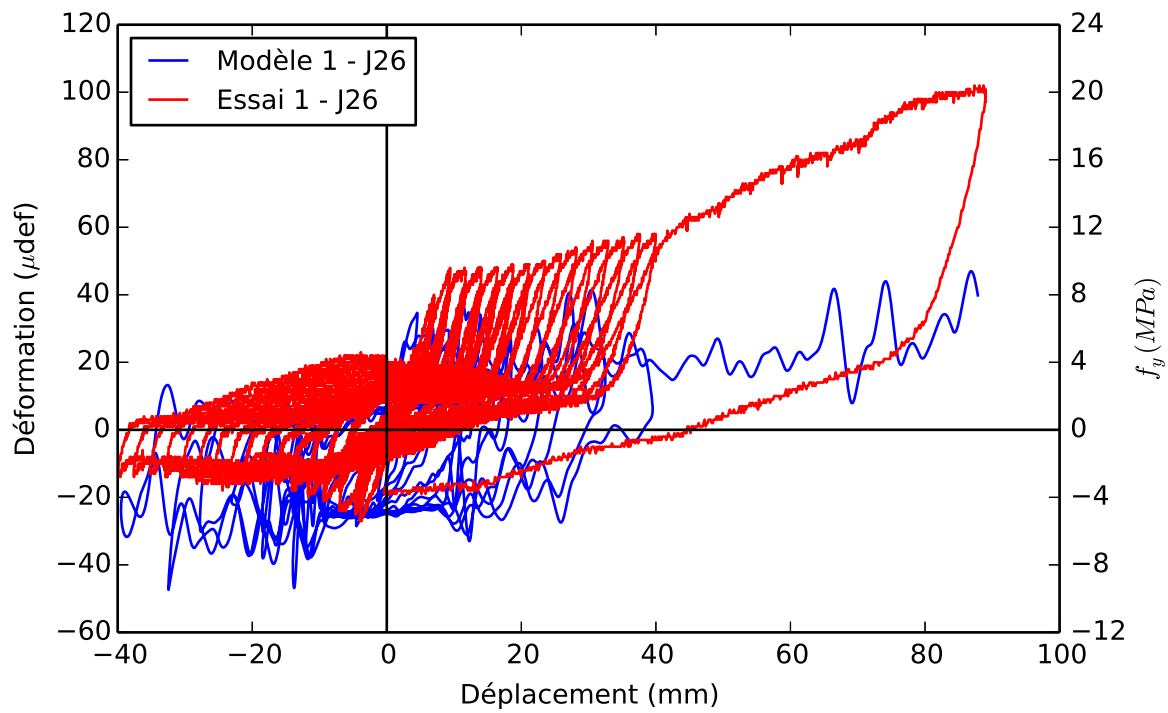


Figure C.14 Graphique des résultats de la jauge 26

C.2 Charge d'impact (modèle 2.2 et essai 2)

C.2.1 Graphiques des résultats des jauges des armatures

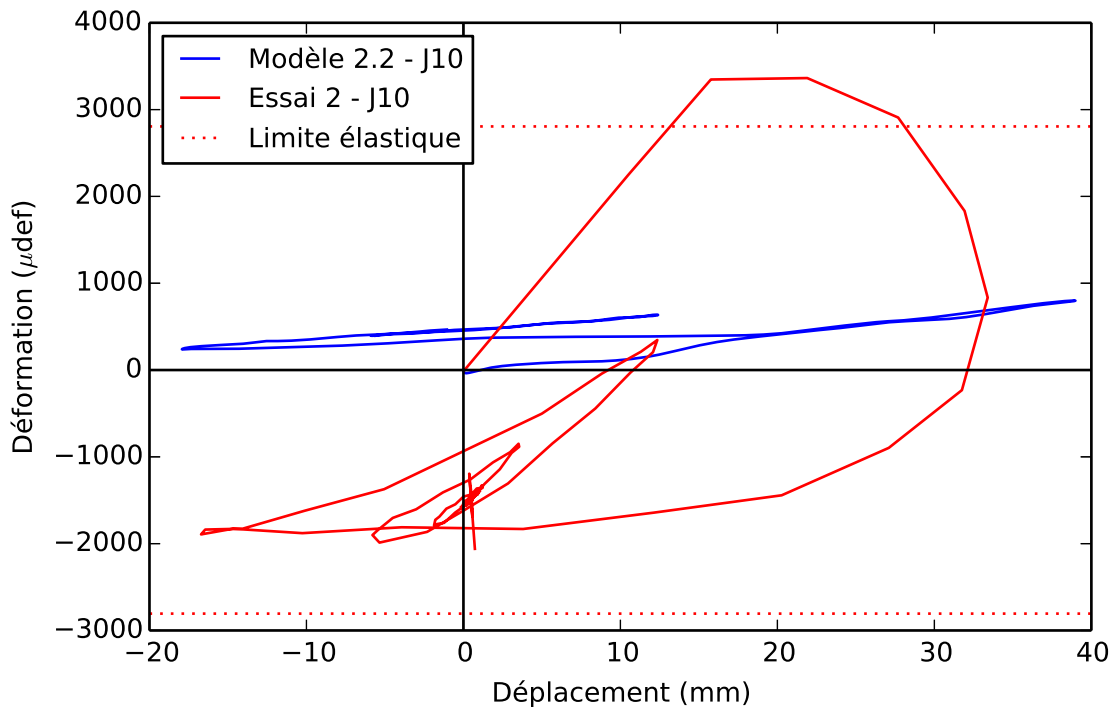


Figure C.15 Graphique des résultats de la jauge 10

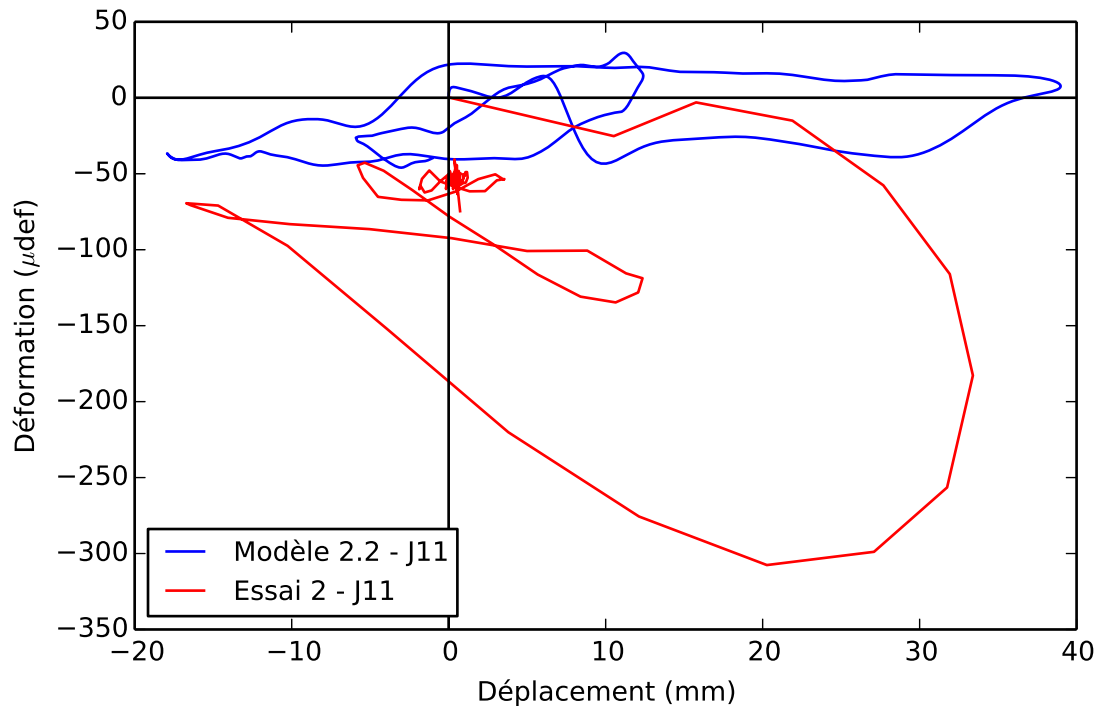


Figure C.16 Graphique des résultats de la jauge 11

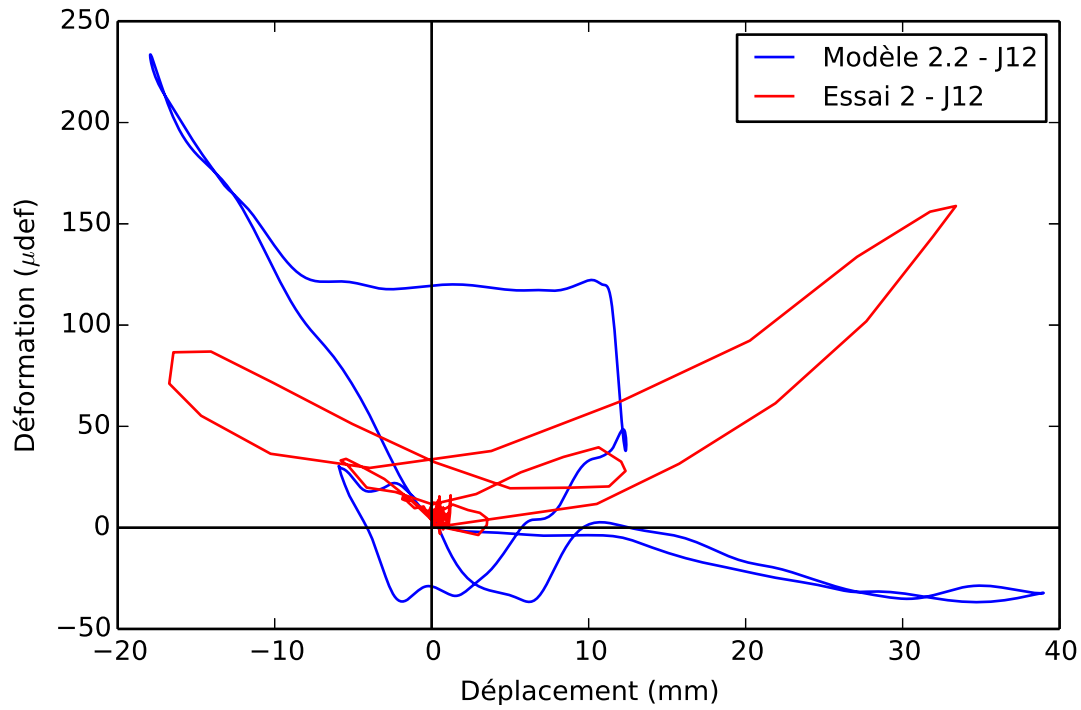


Figure C.17 Graphique des résultats de la jauge 12

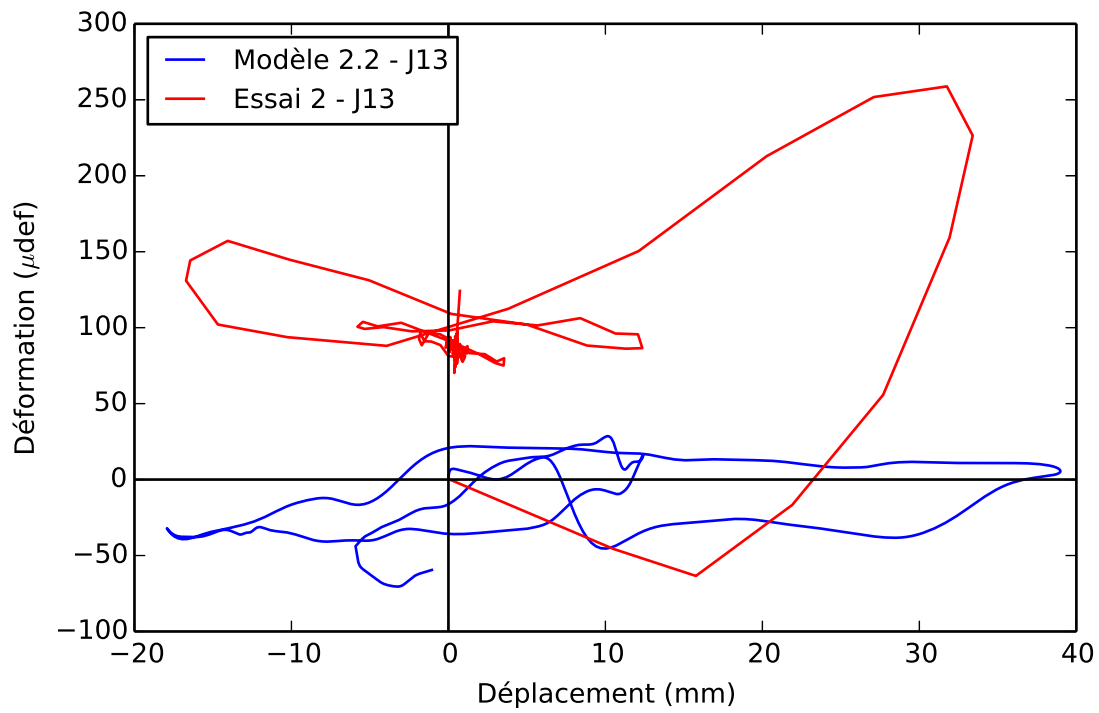


Figure C.18 Graphique des résultats de la jauge 13

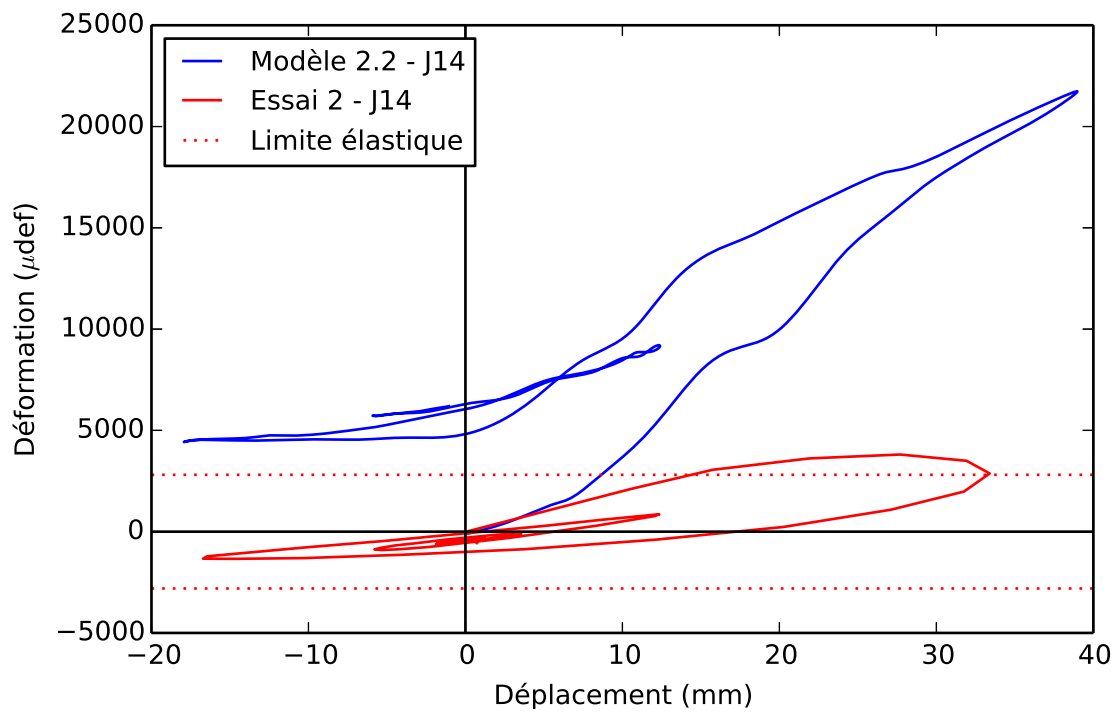


Figure C.19 Graphique des résultats de la jauge 14

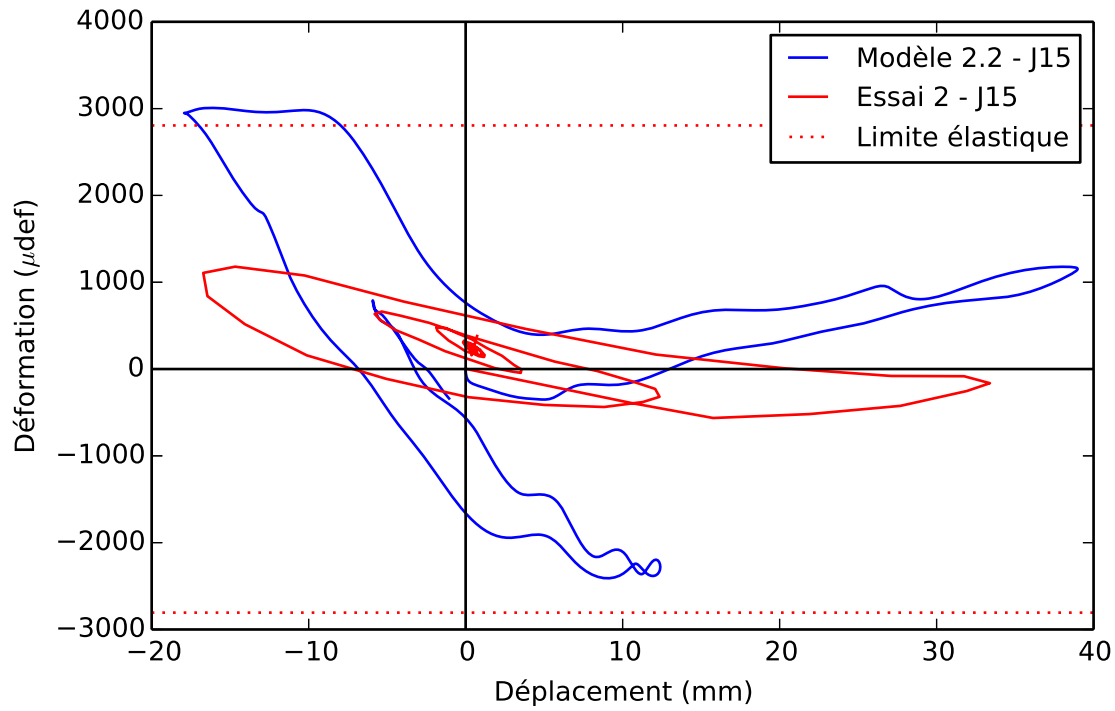


Figure C.20 Graphique des résultats de la jauge 15

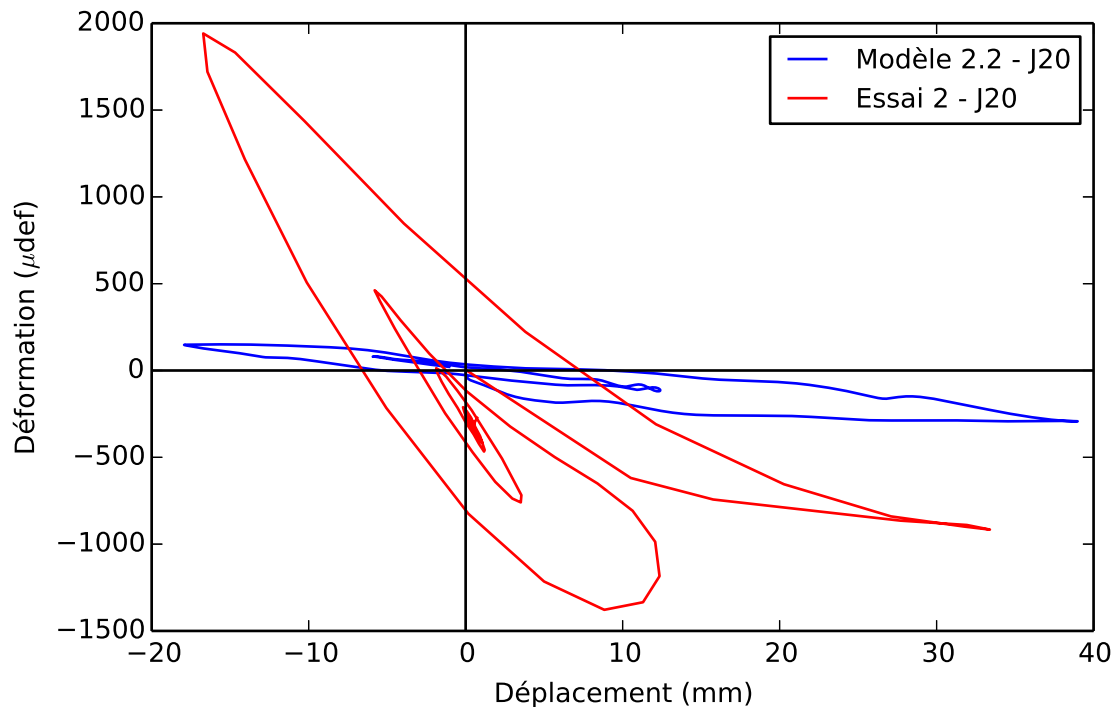


Figure C.21 Graphique des résultats de la jauge 20

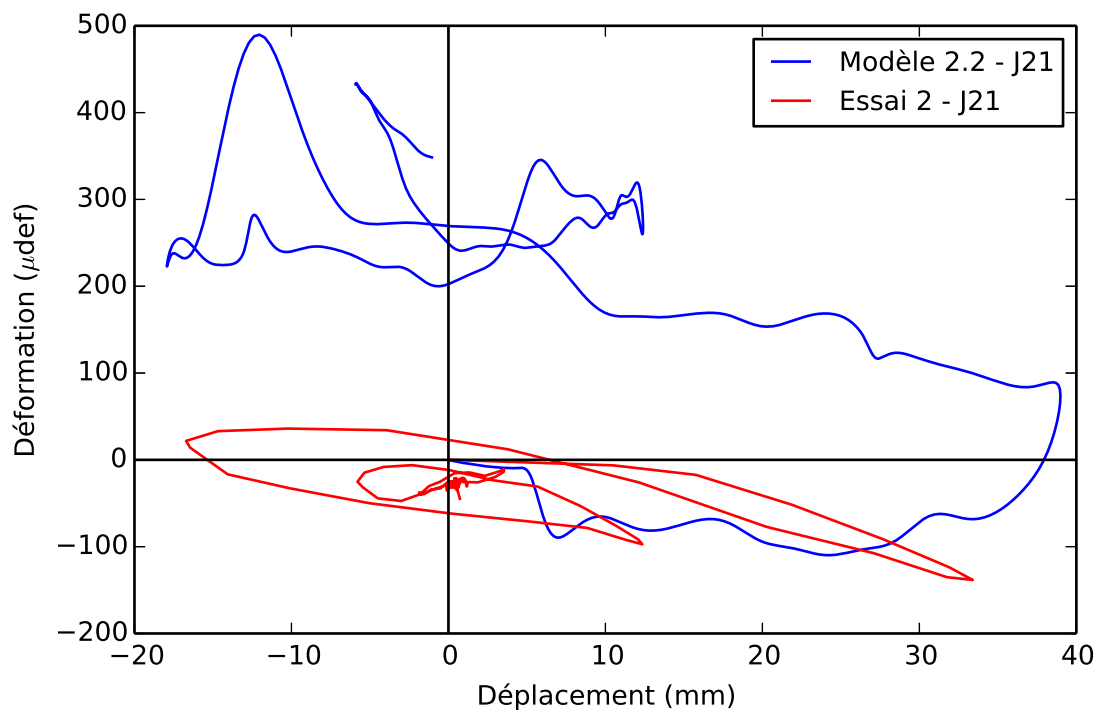


Figure C.22 Graphique des résultats de la jauge 21

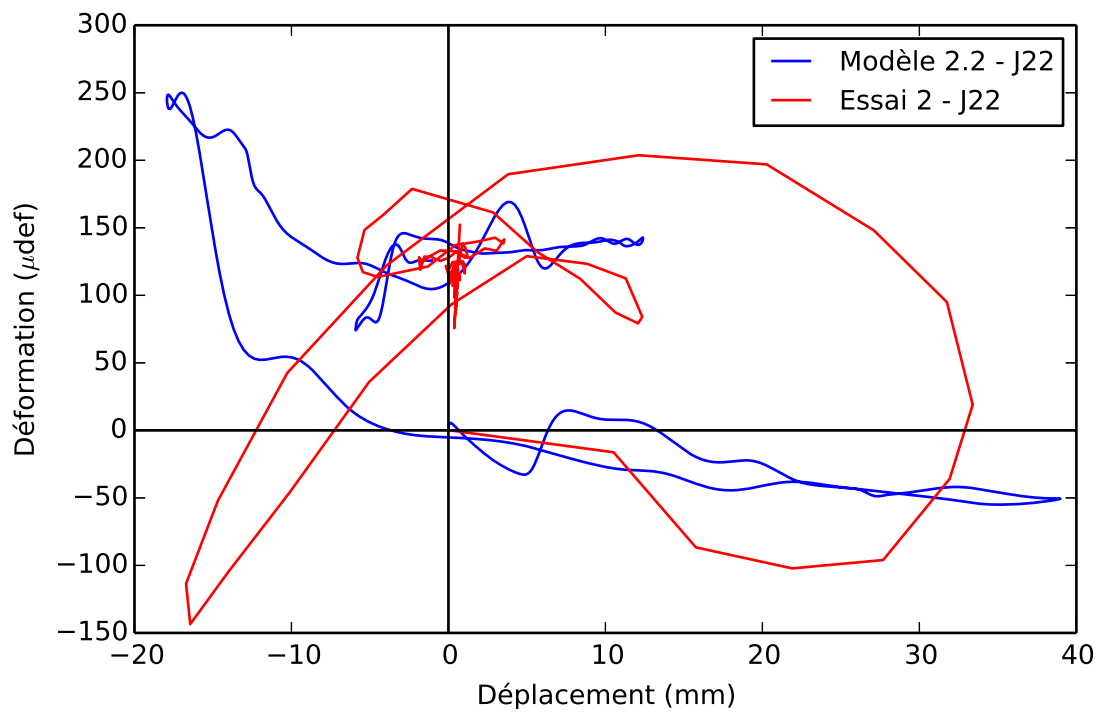


Figure C.23 Graphique des résultats de la jauge 22

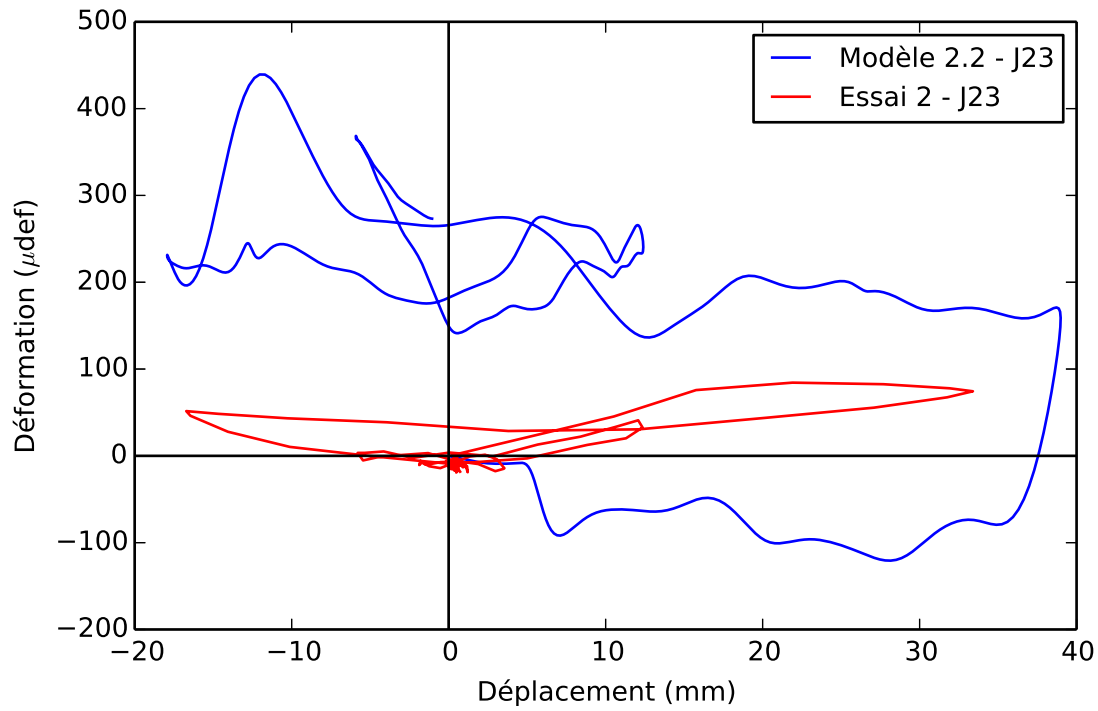


Figure C.24 Graphique des résultats de la jauge 23

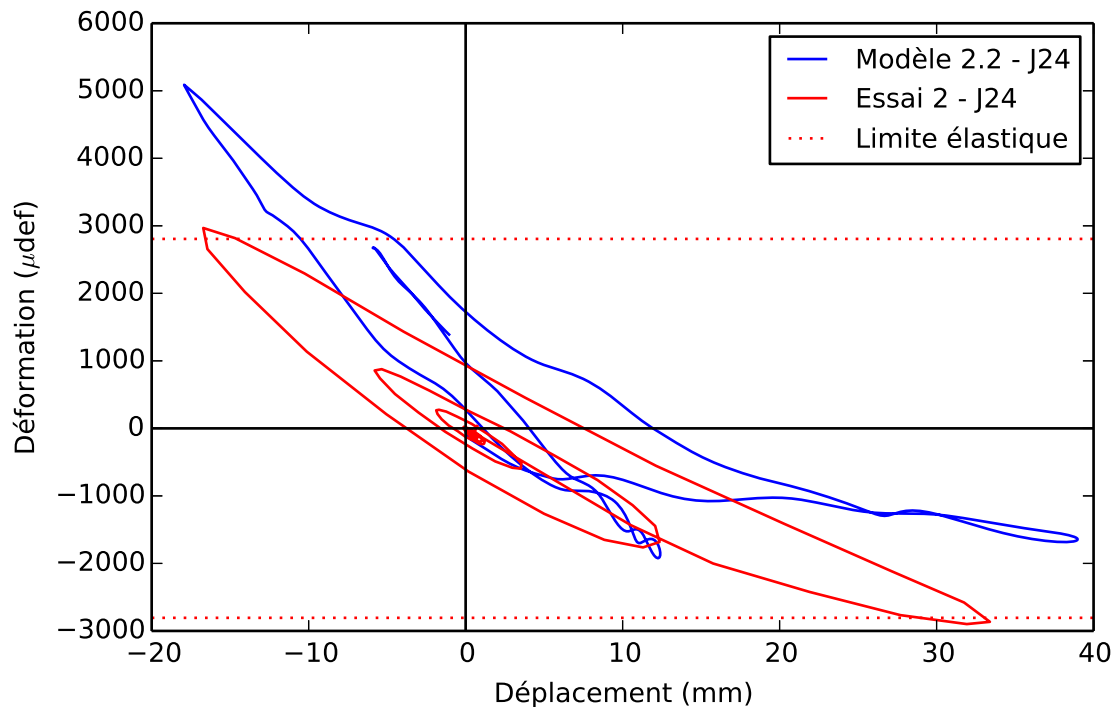


Figure C.25 Graphique des résultats de la jauge 24

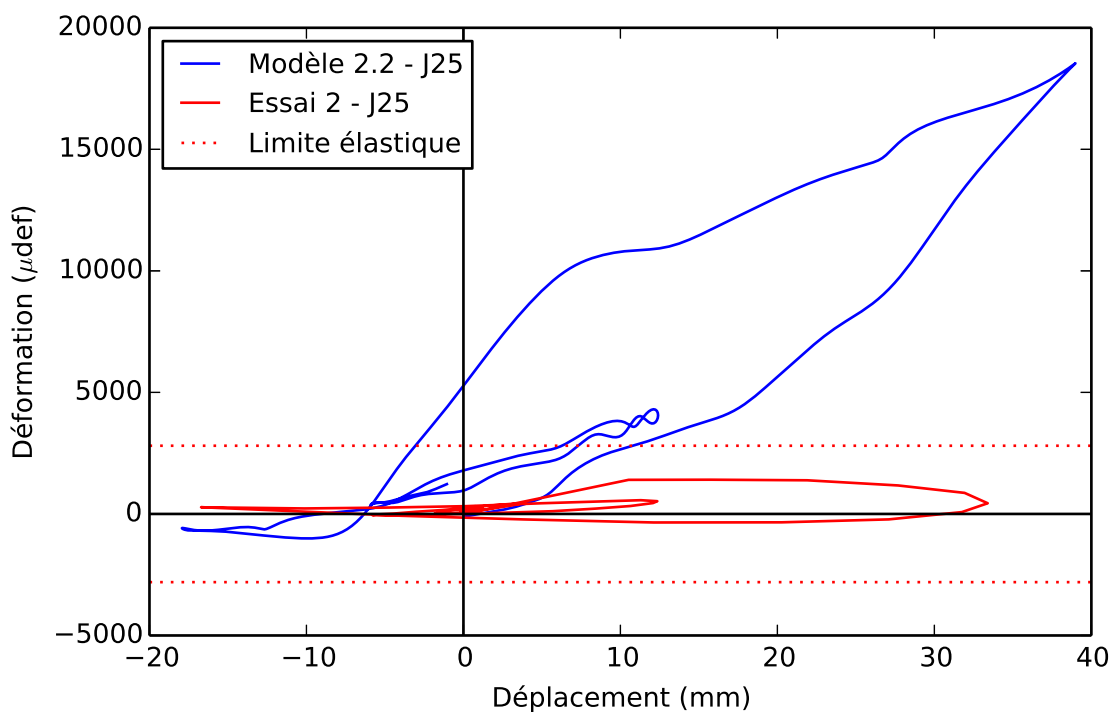


Figure C.26 Graphique des résultats de la jauge 25

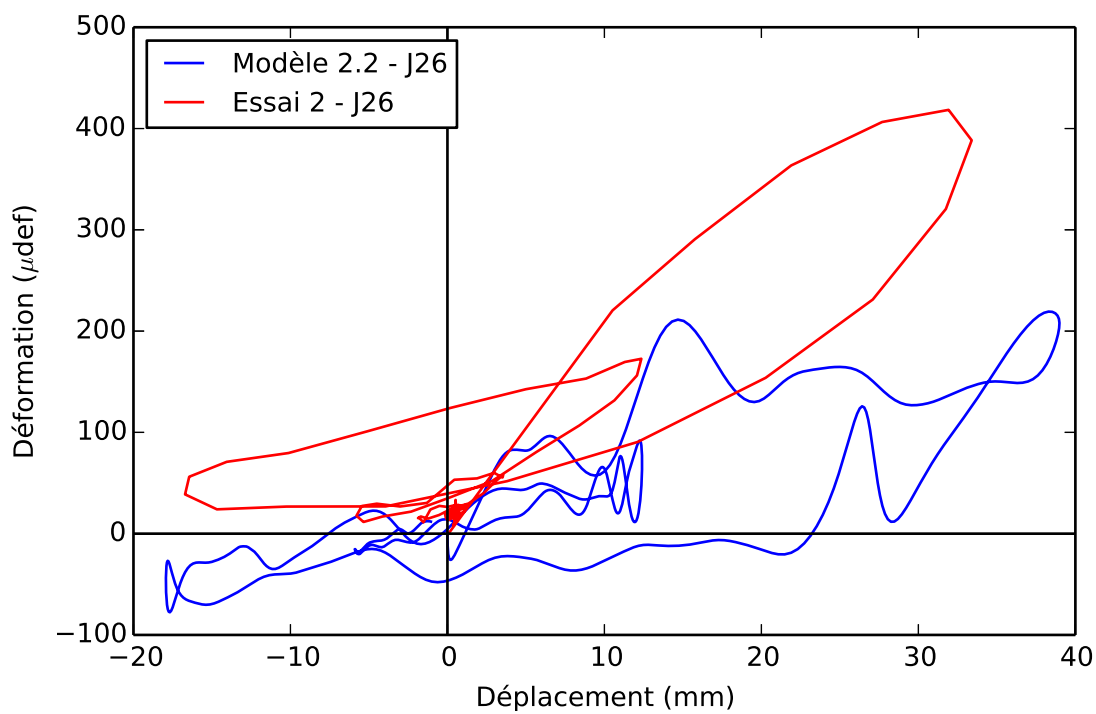


Figure C.27 Graphique des résultats de la jauge 26

C.2.2 Graphiques des résultats des jauges à béton

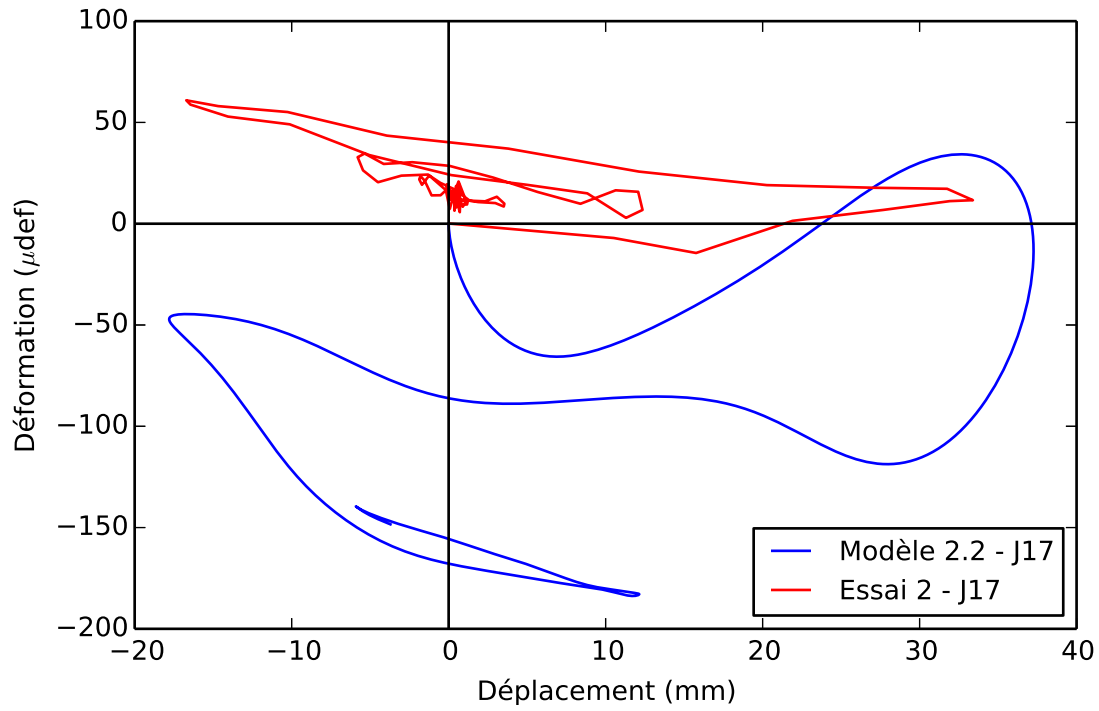


Figure C.28 Graphique des résultats de la jauge 17

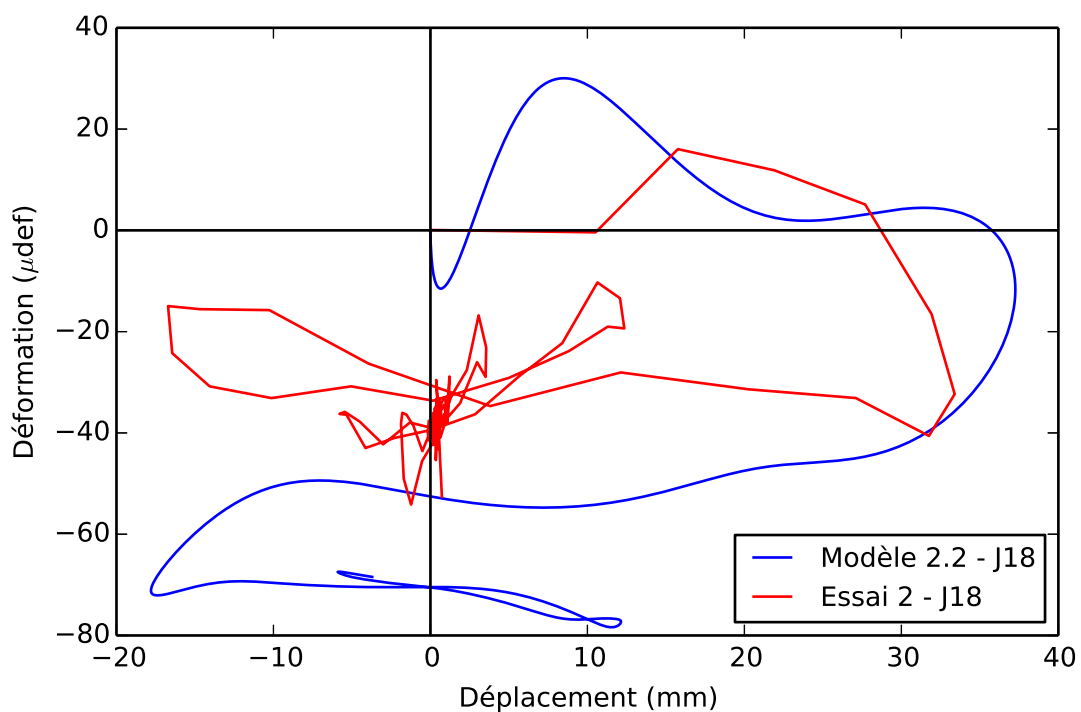


Figure C.29 Graphique des résultats de la jauge 18

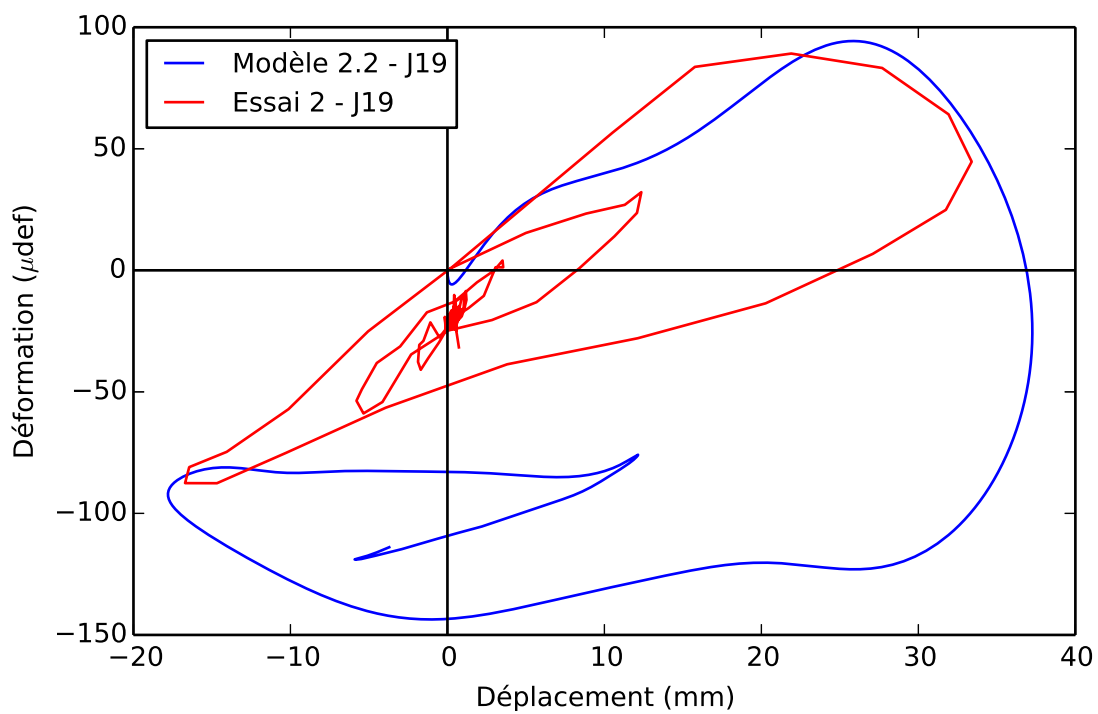


Figure C.30 Graphique des résultats de la jauge 19

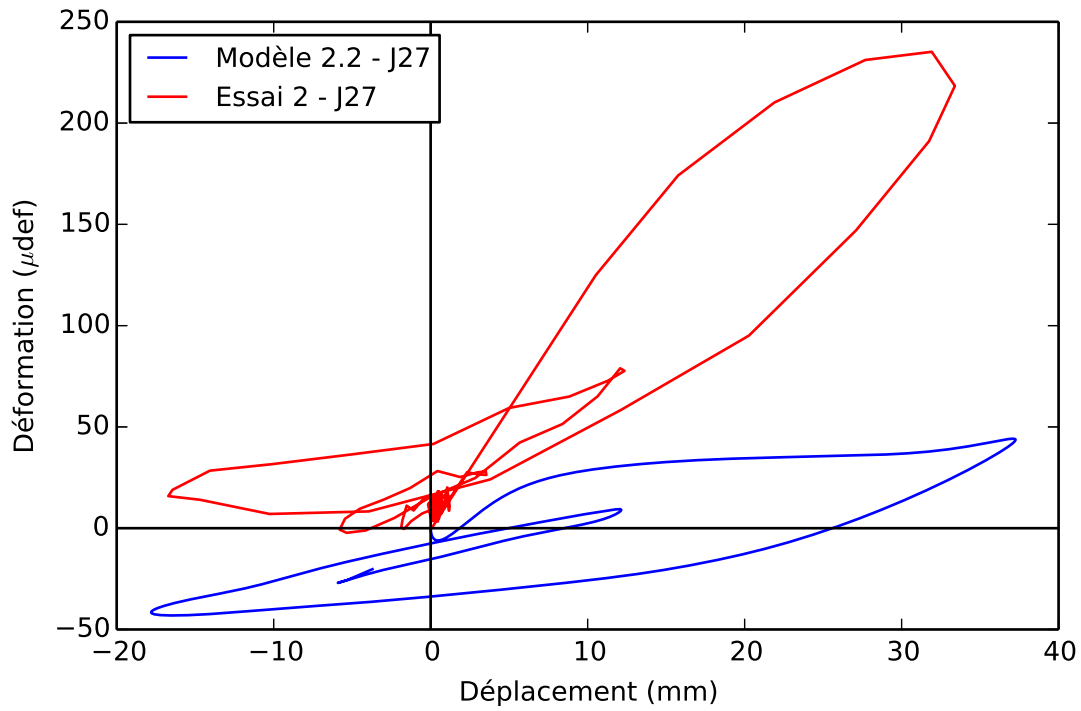


Figure C.31 Graphique des résultats de la jauge 27

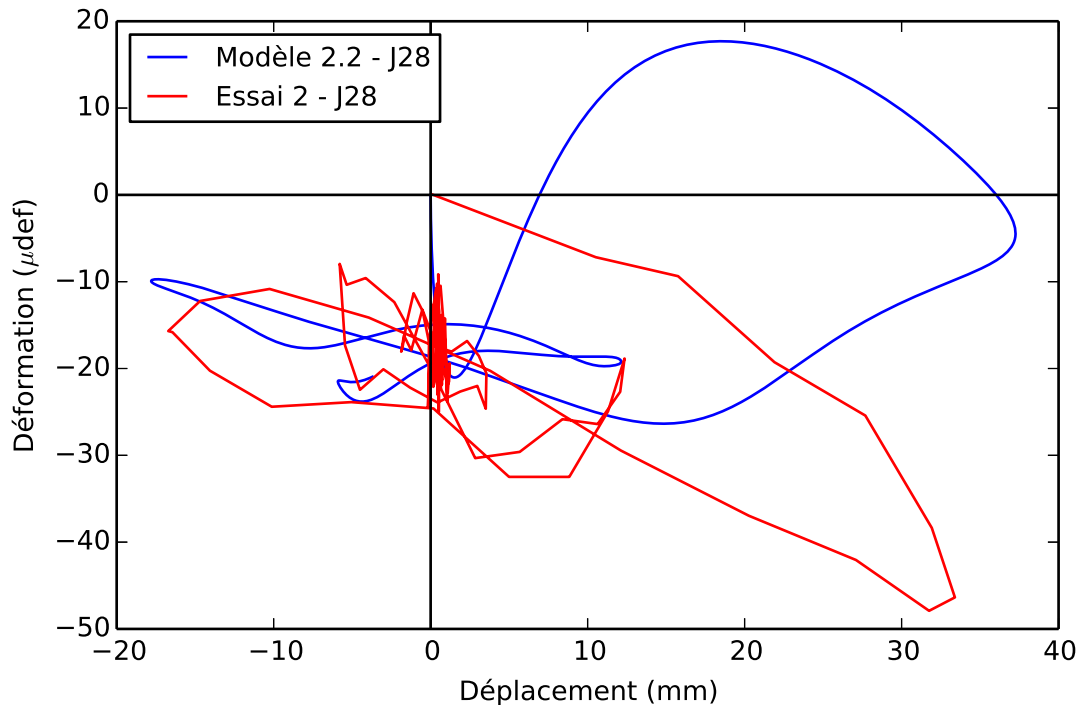


Figure C.32 Graphique des résultats de la jauge 28

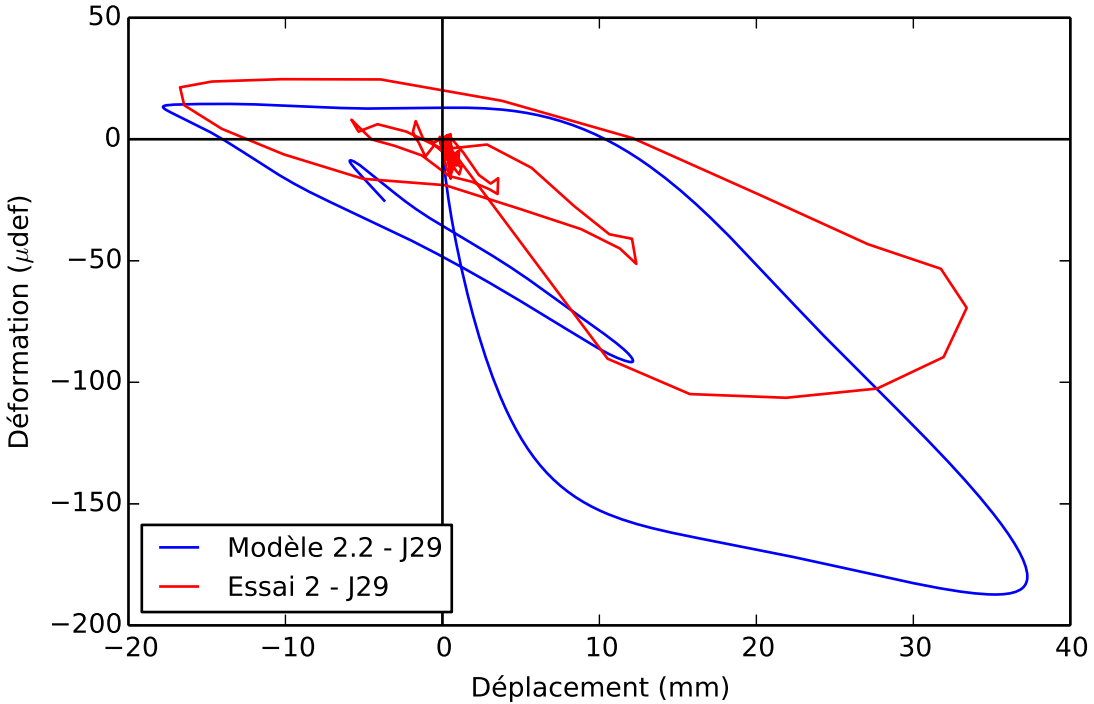


Figure C.33 Graphique des résultats de la jauge 29

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Agrawal, A. K., Xu, X. et Chen, Z. (2011). *Bridge-Vehicle Impact Assessment* (Rapport technique). The City College of New York, 168 p.
- Aldea, M., Charest, N. et Ruscitti, I. (2013). Remplacement par méthode « optimisé » du pont d'étagement du chemin fer-à-cheval au-dessus de l'autoroute 20 à sainte-julie. Dans *20e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*. www.mtq.gouv.qc.ca.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). *AASHTO LRFD bridge design specifications, customary U.S. units*, 6^e édition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Association canadienne de normalisation (2006a). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CSA-S6-06)*, 10^e édition. Association canadienne de normalisation, Mississauga, Ont., 768 p.
- Association canadienne de normalisation (2006b). *Commentary on CSA-S6-06, Canadian Highway Bridge Design Code, volume S6.1-06*. Association canadienne de normalisation, Mississauga, Ont., 606 p.
- Association canadienne de normalisation (2009). *Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton (CSA-A23.2-09)*, 11^e édition. Association canadienne de normalisation, Mississauga, Ont., 580 p.
- Association canadienne de normalisation (2014). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CSA-S6-14)*, 11^e édition. Association canadienne de normalisation, Mississauga, Ont., 885 p.
- Bathe, K. J. (2006). *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe, 1037 p.
- Bathe, K. J., Guillermin, O., Walczak, J. et Chen, H.-Y. (1997). Advances in nonlinear finite element analysis of automobiles. *Computers and Structures*, volume 64, p. 881–891.
- Boulet, D. (2011). *Mesures temporaires suite à l'endommagement des poutres par un impact de véhicule* (Avis technique). Transports Québec, Direction des structures, 1 p.
- Buth, C. E., Williams, W. F., Brackin, M. S., Lord, D., Geedipally, S. R. et Abu-Odeh, A. Y. (2010). *Analysis of Large Truck Collisions With Bridge Piers : Phase 1* (Rapport technique). Texas Transportation Institute, 186 p.
- Chu, L. M. et Zhang, L. M. (2011). Centrifuge modeling of ship impact loads on bridge pile foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, volume 137, numéro 4, p. 405–420.
- Comité Euro-International du Béton (1993). *CEB-FIP Model Code 1990*. Thomas Telford Services LLtd, London, 437 p.

- Consolazio, G. R., Cook, R. A. et McVay, M. C. (2006). *Barge Impact Testing of the St. George Island Causeway Bridge Phase III : Physical Testing and Data Interpretation* (Rapport technique). University of Florida, Gainesville, Floride, États-Unis, 240 p.
- Consolazio, G. R. et Cowan, D. R. (2003). Nonlinear analysis of barge crush behavior and its relationship to impact resistant bridge design. *Computers and Structures*, volume 81, p. 547–557.
- Consolazio, G. R. et Cowan, D. R. (2005). Numerically efficient dynamic analysis of barge collisions with bridge piers. *Journal of Structural Engineering*, p. 1256–1266.
- Consolazio, G. R., Getter, D. J. et Davidson, M. T. (2010). *A Static Analysis Method for Barge-Impact Design of Bridges with Consideration of Dynamic Amplification* (Rapport technique). University of Florida, Gainesville, Floride, États-Unis, 240 p.
- Cowan, R. D. (2007). *Development of Time-History and Response Spectrum Analysis Procedures for Determining Bridge Response to Barge Impact Loading*. Thèse, University of Florida, Gainesville, Fl, États-Unis, 240 p.
- Cowper, G. R. et Symonds, P. S. (1957). *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams* (Rapport technique). Brown University Division of Applied Mathematics, Providence, Rhode Island, États-Unis, 46 p.
- Crawford, J. E., Wu, Y., Choi, H.-J., Magallanes, J. M. et Lan, S. (2012). *Use and validation of the release III K&C concrete material model in LS-DYNA* (Rapport technique). Karagozian & Case, Glendale, Californie, États-Unis, 388 p.
- Cusson, D. et Paultre, P. (1995). Stress-strain model for confined high-strength concrete. *Journal of Structural Engineering*, volume 121, numéro 3, p. 468–477.
- Dorsselaer, N. V., Lapoujade, V., Nahas, G., Tarallo, F. et Rambach, J. M. (2012). General approach for concrete modeling : Impact on reinforced concrete. Dans *12th International LS-DYNA Users Conference*. LSTC.
- El-Tawil, S., Severino, E. et Fonseca, P. (2005). Vehicle collision with bridge piers. *Journal of Bridge Engineering*, volume 10, numéro 3, p. 345–353.
- Fan, W. et Yuan, W. C. (2012). Shock spectrum analysis method for dynamic demand of bridge structures subjected to barge collisions. *Computers and Structures*, volume 90-91, p. 1–12.
- Fu, H. C., Erki, M. A. et Seckin, M. (1991). Review of effects of loading rate on reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, volume 117, numéro 12, p. 3660–3679.
- Getter, D. J., Consolazio, G. R. et Davidson, M. T. (2011). Equivalent static analysis method for barge impact-resistant bridge design. *Journal of Bridge Engineering*, p. 718–727.
- Jiang, T., Grzebieta, R. H. et Zhao, X. L. (2004). Predicting impact loads of a car crashing into a concrete roadside safety barrier. *IJCrash*, volume 9, numéro 1, p. 45–63.

- Landry-Michaud, L., Lamarche, C.-P. et Roy, N. (2015). *Conception, construction et validation d'un mécanisme novateur permettant d'effectuer des essais hybrides en temps réel contrôlés en force avec un vérin hydraulique*. Mémoire, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Qc, Canada, 85 p.
- Lapointe, E., Carboneau, C., Proulx, J. et Paultre, P. (2009). *Langage d'analyse des structures (LAS)*. version 2.62, (Logiciel), Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke.
- LSTC (2006). *LS-DYNA Theory Manual*. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, Cal, 680 p.
- LSTC (2013a). *LS-DYNA Keyword User's Manual, volume I*.
- LSTC (2013b). *LS-DYNA Keyword User's Manual, volume II*.
- LSTC inc. (2017). *LSTC*. <http://www.LSTC.com> (page consultée le 16 juillet 2017).
- LSTC inc. et DYNAmore GmbH (2016). *LS-DYNA Support*. <http://www.dynasupport.com> (page consultée le 5 mars 2016).
- Lu, H. S., Zhao, J. Y., Wang, X. W., Lei, X., Wu, C. T. et Wu, Y. C. (2012). Simulation of reinforced concrete structure under impact loading using meshfree cohesive failure approach. Dans *12th International LS-DYNA Users Conference*. LSTC.
- Malvar, L. J. et Ross, C. A. (1998). Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Materials Journal*, volume 95, numéro 6, p. 735–739.
- Micro-Measurements (2011). *Errors Due to Transverse Sensitivity in Strain Gages* (Rapport technique). Vishay Precision Group, 9 p.
- Mo, Y. L. et Chan, J. (1996). Bond and slip of plain rebars in concrete. *Journal of materials in civil engineering*, volume 8, numéro 4.
- Moncarz, P. D. et Krawinkler, H. (1981). *Theory and Application of Experimental Model Analysis in Earthquake Engineering* (Rapport technique). Stanford University, Department of Civil and Environmental Engineering, 263 p.
- National Crash Analysis Center (27 août 2012). *National Crash Analysis Center*. <http://www.ncac.gwu.edu/> (page consultée le 21 août 2013).
- National Transportation Research Center Inc. (2009). *FEM Models for Semitrailer Trucks*. <http://tractor-trailer.model.ntrci.org/> (page consultée le 21 août 2013).
- Paik, J. K. et Thayamballi, A. K. (2003). *Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures*. John Wiley and Sons, West Sussex, 544 p.
- Paultre, P. (2000). *WMNPhi*. version 3.0, (Logiciel), Sherbrooke.
- Paultre, P. (2005). *Dynamique des structures*. Hermes Lavoisier, Paris, 702 p.
- Paultre, P. (2011). *Structures en béton armé*. Presses internationales Polytechnique, Montréal, 897 p.

- Plaxico, C., Miele, C. et Kennedy, J. (2009). *Finite Element Analysis Crash Model of Tractor-Trailers Phase B* (Rapport technique). National Transportation Research Center, Knoxville, Tennessee, United States, 210 p.
- Sha, Y. et Hao, H. (2012). Nonlinear finite element analysis of barge collision with a single bridge pier. *Engineering Structures*, volume 41, p. 63–76.
- Soroushian, P., Obaseki, K., Nagi, M. et Rojas, M. C. (1988). Pullout behavior of hooked bars in exterior beam-column connections. *ACI Structural Journal*, volume 85, numéro 3, p. 269–276.
- Verderame, G. M., Ricci, P., De Carlo, G. et Manfredi, G. (2009). Cyclic bond behaviour of plain bars. part i : Experimental investigation. volume 23, p. 3499–3511.
- Wardhana, K. et Hadipriono, F. C. (2003). Analysis of recent bridge failures in the united states. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, volume 17, numéro 3, p. 144–150.
- Wu, Y., Crawford, J. E. et Magallanes, J. M. (2012). Performance of ls-dyna concrete constitutive models. Dans *12th International LS-DYNA Users Conference*. LSTC.
- Wu, Z., Zhang, X., Zheng, J., Hu, Y. et Li, Q. (2014). Bond behavior of plain round bars embedded in concrete subjected to biaxial lateral tensile-compressive stresses. *Journal of structural engineering*, volume 140, numéro 4.

