

Titre: Modélisation numérique de l'impact d'un véhicule sur un tablier de pont
Title:

Auteur: Paul Gouëzec
Author:

Date: 2026

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Gouëzec, P. (2026). Modélisation numérique de l'impact d'un véhicule sur un tablier de pont [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/76875/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/76875/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Najib Bouaanani
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Modélisation numérique de l'impact d'un véhicule sur un tablier de pont

PAUL GOUËZEC

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie civil

Avril 2026

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Modélisation numérique de l'impact d'un véhicule sur un tablier de pont

présenté par **Paul GOUËZEC**

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

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

Jean-Philippe CHARRON, président

Najib BOUAANANI, membre et directeur de recherche

Rocio SEGURA, membre

DÉDICACE

*À ma famille,
Au Groupe de recherche en Génie des Structures. . .*

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier le Professeur Bouaanani pour son expertise et le soutien financier qu'il a pu m'accorder durant ma maîtrise.

Je remercie également Ehsan Rowzeh, Réza Delzendeh ainsi que Gholamreza Gholipour pour leur précieuse aide qui m'a permis de réaliser ce projet.

Je voudrais remercier Maxence Nicq, Léa Zheng et Jean-Baptiste Charrié pour leur soutien et leurs conseils durant ces deux années.

Finalement, merci à Lucas Poitevin, Lucie Lechevalier et Kamrul Islam pour leur présence au laboratoire du GRS.

RÉSUMÉ

Les collisions des véhicules sur les tabliers de ponts constituent un enjeu important pour l'intégrité des infrastructures et la sécurité des usagers. En effet, les impacts de véhicules dépassant la limite maximale de hauteur autorisée surviennent fréquemment sur des tabliers de ponts, engendrant généralement la fermeture de l'infrastructure et de ce fait d'importantes conséquences sur les axes de transport. Ces dernières années, un cas particulier de ce type d'accidents s'est souvent produit sur les routes québécoises et canadiennes : les engins de chantier transportés sur des semi-remorques. Dans la littérature scientifique, les études de collisions sur les ponts ont davantage traité des cas d'impacts sur les piles de ponts que sur les tabliers, considérant le rôle critique de ces composantes dans l'intégrité structurelle du pont et la fréquence relativement plus grande de ce type d'événement. Le manque de connaissances quant aux effets d'un accident sur un tablier de pont se remarque également en s'intéressant aux différentes normes existantes portant sur les charges accidentelles. En effet, seul le code européen (Eurocode) fournit une expression pour évaluer la force d'impact en fonction de la rigidité, la masse et la vitesse de l'objet impactant. Cette expression simplifiée peut néanmoins sous-estimer la force d'impact réelle, notamment à cause des effets dynamiques qui ne sont généralement pas pris en compte.

Ce mémoire a donc pour objectif de présenter une étude progressive et préliminaire visant l'évaluation des effets des impacts de véhicules lourds sur des tabliers de ponts. Dans un premier temps, des analyses numériques d'un impact simplifié entre deux objets sont effectuées pour mieux cerner les paramètres de la modélisation numérique de ce phénomène. Les formulations implicite et explicite sont explorées en utilisant les logiciels d'éléments finis ADINA et LS-DYNA, respectivement. Ensuite, la modélisation numérique de l'impact d'une plaque en acier sur un tablier de pont simplifié est réalisée. Le logiciel ADINA a été utilisé pour une résolution implicite du modèle, tandis que le logiciel LS-DYNA a été employé pour une résolution explicite. Ce premier modèle a été utilisé pour effectuer une analyse paramétrique de la collision, permettant d'identifier les principaux facteurs influençant la force de contact, dont la masse, la vitesse et la rigidité du véhicule. Dans un second temps, le modèle numérique est amélioré en intégrant notamment un plateau pouvant représenter la plateforme d'un camion. Finalement, une collision à taille réelle est étudiée en modélisant une excavatrice et un tablier de dimensions réalistes sous LS-DYNA. Une comparaison préliminaire avec la prédiction de la force d'impact préconisée par l'Eurocode est présentée.

ABSTRACT

The collision of vehicles on bridge decks is a major issue for infrastructures and public safety. Indeed, impacts from overheight vehicles frequently occur on bridge decks, causing traffic closures and, consequently, significant impacts on the transportation network. In recent years, several cases of excavators carried by semi-trucks hitting bridge decks have been reported across Québec and Canada. According to existing research, most studies have focused on impacts on substructures such as bridge piers, due to their crucial role in the structural integrity of the bridge, rather than on bridge decks. This lack of knowledge regarding the effects of accidents on bridge decks can also be observed when examining the different existing standards related to accidental loads. Indeed, only the European code provides an expression to evaluate the impact force as a function of the stiffness, mass and velocity of the impacting object. However, this force appears to be underestimated, mainly because dynamic effects are not taken into account. Therefore, the objective of this Master thesis is to present a preliminary numerical study of the impact of heavy vehicles on bridge decks.

First, a preliminary numerical analysis of the contact is carried out in order to gain a deeper understanding of the impact phenomenon between two bodies. The numerical analyses are performed using two different finite element software programs, i.e. ADINA and LS-DYNA, which implement implicit and explicit formulations, respectively.

In order to avoid long computation times, a first simplified version of the impact of a vehicle on a bridge deck was modeled, considering only an impacting steel plate colliding with a simplified bridge deck. To highlight the dynamic effects occurring during the impact, ADINA was used for an implicit resolution of the model, while LS-DYNA was employed for an explicit resolution. A parametric analysis was then performed on this model to identify the key factors influencing the contact force, such as the vehicle's mass, velocity and stiffness. In a second phase, the model is improved namely by adding a platform that can model the flatbed of a truck. Finally, a more realistic full-scale model including a truck carrying an excavator is developed and used for a preliminary evaluation of impact forces. A preliminary comparison with the impact force predicted by the Eurocode is presented.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	vii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Éléments de la problématique	1
1.2 Objectifs de recherche	5
1.3 Plan du mémoire	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Introduction	6
2.2 Analyse statistique des accidents entre les véhicules et les ponts/tabliers de pont	6
2.3 Bases théoriques	8
2.3.1 Principe de force statique équivalente	8
2.3.2 Principe de résistance des matériaux sous les charges accidentelles	8
2.3.3 Déformations élastiques/plastiques	9
2.3.4 Non-linéarité des matériaux	9
2.4 Normes internationales	12
2.4.1 Canada (CSA)	12
2.4.2 États-Unis (AASHTO)	12
2.4.3 Europe (Eurocode)	12
2.5 Études sur les impacts de véhicule sur les piles de pont	14
2.6 Études sur les impacts de véhicule sur les tabliers de pont	14
2.6.1 Impact sur les poutres en béton	15
2.6.2 Impact sur les poutres en acier	19
2.6.3 Études énergétiques d'impact	23

2.7	Conclusions préliminaires	24
2.8	Solutions proposées et recommandations	24
2.9	Lacunes dans ce domaine	26
CHAPITRE 3 MODÉLISATION SIMPLIFIÉE DE L'IMPACT ENTRE UN VÉHI-		
	CULE ET UN TABLIER DE PONT	27
3.1	Introduction	27
3.2	Estimation de la force d'impact d'un véhicule sur une structure de pont selon l'Eurocode	27
3.3	Modélisation des impacts dans les logiciels d'éléments finis	28
3.3.1	Modélisation numérique : analyses implicite et explicite	28
3.3.2	Choix du logiciel de modélisation	29
3.3.3	Définition du contact dans le logiciel ADINA	30
3.3.4	Définition du contact dans le logiciel LS-DYNA	31
3.4	Analyse numérique d'un modèle simplifié de l'impact d'un camion sur un tablier de pont	33
3.4.1	Présentation des résultats de Berton et al. sur ADINA	33
3.4.2	Modélisation numérique sur ADINA	33
3.4.3	Modélisation numérique sur LS-DYNA	35
3.4.4	Comparaison du contact entre les logiciels ADINA et LS-DYNA	35
3.4.5	Comparaison énergétique des modèles ADINA et LS-DYNA	38
3.4.6	Analyse paramétrique	41
3.4.7	Modélisation de la route et du plateau du camion	51
3.4.8	Comparaison préliminaire avec l'Eurocode	53
3.4.9	Conclusions sur le modèle simplifié	53
CHAPITRE 4 ANALYSE NUMÉRIQUE DE L'IMPACT D'UN CAMION TRANS-		
	PORTANT UNE EXCAVATRICE SUR UN TABLIER DE PONT	55
4.1	Présentation du modèle	55
4.1.1	Introduction	55
4.1.2	Les différents composants du modèle	55
4.2	Modélisation sur LS-DYNA et hypothèses considérées	60
4.3	Analyse et résultats du modèle	64
4.3.1	Domages observés sur la structure	69
4.3.2	Comparaison avec l'Eurocode	73
4.3.3	Effet de l'attachement des cornières sur la force de contact	73
4.3.4	Effet de la vitesse initiale sur la force de contact	74

CHAPITRE 5 CONCLUSION	76
5.1 Synthèse des travaux	76
5.2 Limitations de la solution proposée	77
5.3 Améliorations futures	78
RÉFÉRENCES	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Forces indicatives de l'Eurocode pour les impacts de véhicule sur les structures en fonction du type de route, Eurocode [1]	13
Tableau 2.2	Tableau récapitulatif des différentes forces de contact obtenues dans la littérature lors d'une modélisation numérique d'une collision	24
Tableau 3.1	Tableau récapitulatif de la force numérique obtenue sur LS-DYNA et sa valeur prescrite par l'Eurocode	53
Tableau 4.1	Tableau récapitulatif des matériaux utilisés dans le modèle numérique	61
Tableau 4.2	Paramètres de vitesse de déformation du matériau du bras de l'excavatrice	61
Tableau 4.3	Épaisseurs des éléments "shell" utilisés pour le tablier de pont	62
Tableau 4.4	Taille des éléments impliqués dans le contact excavatrice/tablier	63
Tableau 4.5	Friction appliquée entre différentes interfaces du modèle numérique	63
Tableau 4.6	Récapitulatif des résultats de forces de contact en fonction de la vitesse initiale	75

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Déformation et rupture plastique d'une poutre après une collision avec un véhicule survenue à l'Assomption (Québec), Édouard Berton, 2016 [2]	2
Figure 1.2	Poids-lourd impliqué dans l'accident à l'Assomption, Maxime Deland (Agence QMI), 2016 [3]	2
Figure 1.3	Accident survenu entre un camion et le Can Opener Bridge, Jürgen Henn, 2018 [4]	4
Figure 2.1	Fréquence d'accidents survenus sur des ponts dans le Maryland entre 1995 et 2000 et par rapport à l'année 1995, Agrawal et al. (2008)	6
Figure 2.2	Nombre de collisions observées sur des ponts en fonction du type d'élément du pont, Agrawal et al. (2008)	7
Figure 2.3	Différents dommages observés à la suite de collisions de véhicules sur des ponts	11
Figure 2.4	Étude expérimentale utilisant une masse jetée, Jing (2016) [5]	15
Figure 2.5	Comparaison des forces d'impact de différents objets, Oppong (2020) [6]	16
Figure 2.6	Modélisation numérique de l'impact	18
Figure 2.7	Force de collision obtenue	18
Figure 2.8	Force de collision obtenue à l'aide du logiciel MSC.MARC par Xu et al. [7]	18
Figure 2.9	Analyse paramétrique de certaines propriétés pouvant influencer la force de contact, Kong 2020 [8]	18
Figure 2.10	Étude expérimentale utilisant une masse attachée au bout d'un pendule, Ozdagli (2020) [9]	19
Figure 2.11	Dommages observés sur des poutres en acier, dans la réalité et numériquement, Oppong 2024 [10]	21
Figure 2.12	Modèle numérique d'une collision entre un camion chargé d'une excavatrice sur un tablier de pont, Berton (2017) [2]	22
Figure 2.13	Modèle numérique du choc dur, Thèse de Berton 2021 [11]	23
Figure 2.14	Résultat de l'étude sur le comportement des participants, Horberry 2002 [12]	25
Figure 3.1	Contact sans pénétration dans ADINA [13]	30
Figure 3.2	Contact avec pénétration dans ADINA [13]	31
Figure 3.3	Modèles utilisés sur ADINA et LS-DYNA	35
Figure 3.4	Calibration du contact entre les modèles ADINA et LS-DYNA	37

Figure 3.5	Comparaison de l'énergie cinétique entre le modèle ADINA et le modèle LS-DYNA	38
Figure 3.6	Comparaison de l'énergie interne entre le modèle ADINA et le modèle LS-DYNA	39
Figure 3.7	Comparaison de l'énergie de contact entre le modèle ADINA et le modèle LS-DYNA	40
Figure 3.8	Maillages de la plaque d'impact utilisés dans les modèles ADINA et LS-DYNA	41
Figure 3.9	Force de contact obtenue avec $E = 10^3 Pa$	42
Figure 3.10	Force de contact obtenue avec $E = 2 \times 10^6 Pa$	42
Figure 3.11	Force de contact obtenue avec $E = 200 GPa$	43
Figure 3.12	Force de contact obtenue en fonction de la rigidité de la plaque	44
Figure 3.13	Comparaison de la force obtenue entre la plaque rigide et le solide de rigidité $E = 2 \times 10^{11} Pa$	45
Figure 3.14	Résultats entre les différents facteurs de compliance (C)	46
Figure 3.15	Comparaison de la force de contact en fonction de l'algorithme de contact utilisé	47
Figure 3.16	Évolution de la force de contact en fonction de la vitesse initiale de la plaque d'impact	48
Figure 3.17	Effet de la masse nodale sur la force de contact	49
Figure 3.18	Effet de la masse du tablier de pont sur la force de contact	50
Figure 3.19	Effet de la masse nodale sur la force de contact	51
Figure 3.20	Modélisation numérique avec le camion simplifié	52
Figure 3.21	Résultat de la force de contact en fonction de la friction camion/route	52
Figure 4.1	Aperçu du modèle détaillé sur LS-DYNA	55
Figure 4.2	Freightliner FLD120 1992 [14]	56
Figure 4.3	Semi-remorque 1988 Pines 48-ft	57
Figure 4.4	Éléments de connexion entre la cabine et la semi-remorque	57
Figure 4.5	Excavatrice CAT 320D [15]	58
Figure 4.6	Dimensions du tablier de pont	59
Figure 4.7	Détail des cornières	60
Figure 4.8	Aperçu des différentes interfaces du modèle	64
Figure 4.9	Déroulement de l'impact en vue de coté	66
Figure 4.10	Force de contact selon l'axe X obtenue avec le modèle numérique réaliste	67
Figure 4.11	Force de contact selon l'axe Y obtenue avec le modèle numérique réaliste	68
Figure 4.12	Force de contact selon l'axe Z obtenue avec le modèle numérique réaliste	68

Figure 4.13	Vitesse selon l'axe X du plateau du camion obtenue avec le modèle numérique réaliste	69
Figure 4.14	Déformation plastique de la poutre lors de la collision	70
Figure 4.15	Déformation des cornières et des éléments du tablier de pont lors de l'impact, vue de dessus	71
Figure 4.16	Photos de comparaison avec les dommages observés un accident réel .	72
Figure 4.17	Déformations plastiques observées sur le modèle numérique LS-DYNA	72
Figure 4.18	Comparaison de la force de contact selon l'axe X en fonction de l'attachement des cornières	74
Figure 4.19	Comparaison de la force de contact selon l'axe X en fonction de la vitesse initiale du camion	75

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
USDOT	US Department of Transportation
NYSDOT	New York State Department of Transportation
CSA	Canadian Standards Association
LS-DYNA	Livermore Software – Dynamic Nonlinear Analysis
FHWA	Federal Highway Administration
ADINA	Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis
WSDOT	Washington State Department of Transportation
VDC	Viscous Damping Coefficient
NASTRAN	Nasa Structural Analysis
NTRCI	National Transportation Research Center Inc.
MTQ	Ministère des Transports du Québec

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les collisions entre les véhicules et les ponts ont d'importantes conséquences pour l'intégrité structurelle des ouvrages, et peuvent entraîner la destruction partielle ou totale de la structure. Ce type d'accident peut engendrer des réparations coûteuses et des répercussions socio-économiques majeures dues à la fermeture d'infrastructures routières. De plus, une partie des ponts existants au Québec et au Canada a été conçue avec des normes pensées pour des gabarits de camions moins volumineux, issues d'anciens codes de conception.

L'impact de véhicules sur des piles de pont a fait l'objet de normes de conception, cependant seul l'Eurocode traite également de l'impact des véhicules sur les tabliers de pont. D'autre part, les normes en vigueur dans l'Eurocode ne semblent pas prendre en compte l'aspect dynamique de l'impact. Ce constat soulève des questions quant à l'exhaustivité du code canadien sur le calcul des ponts routiers, tandis que les collisions entre des véhicules et les tabliers de pont se produisent assez fréquemment.

Compte tenu de la complexité et du coût d'une étude expérimentale d'impact de véhicule lourd sur un tablier de pont, la modélisation numérique par éléments finis apparaît comme une méthode intéressante pour étudier en premier lieu ce type de collision tout en permettant de s'approcher d'un scénario réaliste. Des études expérimentales ultérieures seront cependant toujours nécessaires pour valider les résultats numériques.

1.1 Éléments de la problématique

Une enquête menée par l'United States Department of Transportation (USDOT) auprès des départements du transport des différents états des États-Unis a montré que, sur 50 états, 15 ont déclaré que les impacts sur les ponts semblent être un problème mineur, 8 n'ont pas répondu, tandis que 27 ont déclaré qu'il s'agit d'un problème majeur, soit plus de la majorité. De plus, après s'être intéressés aux accidents de véhicules sur les ponts dans différentes régions de l'état de New-York, les auteurs ont conclu que seulement 197 ponts ont été impliqués dans 1 484 collisions entre les années 2001 et 2011, soit une moyenne de 7.5 collisions par pont sur une période de 10 ans [16]. Cela montre effectivement que la question des impacts de véhicules sur les ponts est une problématique sur laquelle des recherches restent à mener

afin d'améliorer la sécurité des personnes et des ouvrages.

Ce constat mérite d'être appuyé par un exemple d'accident survenu en 2016 à l'Assomption (Québec). Plus précisément, un camion-grue transportant des coffrages a heurté avec son bras télescopique le dessous du pont situé au-dessus de l'autoroute sur laquelle le camion circulait, entraînant la déformation plastique des poutres en acier ainsi que la fermeture de cette section de l'autoroute. L'accident n'a blessé personne ; cependant, d'importantes congestions routières ont pu être observées. Le coût total des réparations ainsi que l'impact socio-économique de la fermeture pendant plusieurs mois de l'ouvrage n'ont pas pu être évalués. Dans ce contexte, il est clair que le dimensionnement contre les collisions de véhicules est nécessaire lors de la conception d'ouvrages susceptibles d'être impactés par des véhicules.



FIGURE 1.1 Déformation et rupture plastique d'une poutre après une collision avec un véhicule survenue à l'Assomption (Québec), Édouard Berton, 2016 [2]



FIGURE 1.2 Poids-lourd impliqué dans l'accident à l'Assomption, Maxime Deland (Agence QMI), 2016 [3]

D’après le New York State Department of Transportation (NYSDOT) [17], le pont de l’autoroute Onondaga Lake situé dans l’État de New York aux États-Unis a subi en moyenne 9 collisions de véhicules par an, entre 2020 et 2022, tandis que la moyenne annuelle habituelle était de 3. Ces accidents s’expliquent généralement par le manque de vigilance des conducteurs de poids-lourds et de bus quant à la hauteur de leur véhicule. En effet, la majorité des camions aux États-Unis ont une hauteur comprise entre 13.5 et 14 ft (4.1 à 4.3 m), dépassant largement la hauteur libre sous le pont qui est de 10 ft 9 in (soit 3.28 m). Lors d’une entrevue, le directeur régional du NYSDOT a soulevé l’hypothèse que ces événements peuvent s’expliquer par le fait que de nombreux conducteurs utilisent des applications GPS non commerciales telles que Google Maps, ne prenant en compte que la hauteur des véhicules légers lors du calcul d’itinéraire.

D’autre part, il existe de nombreux anciens ponts de faible hauteur, construits avant que les lois n’autorisent la circulation de camions de plus grande hauteur. A titre d’exemple, le Washington State Department of Transportation (WSDOT) a dénombré plus de 60 ponts possédant une hauteur libre inférieure à la limite minimale établie par l’American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) de 16 ft 6 in dans l’état de Washington (États-Unis) [18].

Un cas célèbre de pont obsolète est le pont de Norfolk Southern–Gregson Street à Durham (Caroline du Nord, États-Unis). Plus célèbre sous le nom de « Can Opener Bridge », ce pont a connu de nombreuses collisions avec des camions à cause de sa faible hauteur (11 ft 8 in, la hauteur recommandée lors de sa conception en 1920). La fréquence élevée de ces accidents a même conduit un habitant de la ville à créer un site internet recensant tous les accidents survenus depuis 2008, à l’aide d’une caméra filmant en permanence la circulation routière du pont.



FIGURE 1.3 Accident survenu entre un camion et le Can Opener Bridge, Jürgen Henn, 2018 [4]

Parmi les accidents entre les poids-lourds et les tabliers de pont, il est intéressant de noter qu'à de nombreuses reprises, l'incident est lié à la hauteur excessive d'un camion transportant un autre engin. En effet, lors du transport d'une excavatrice, d'une grue télescopique ou d'un engin forestier, il peut arriver que le conducteur du chargement omette de vérifier la hauteur totale de son véhicule.

Au Canada, la ville d'Edmonton a connu un premier accident impliquant une excavatrice chargée sur un camion-plateau qui a heurté le tablier d'un pont situé au-dessus de l'auto-route Whitemud Drive en 2023, puis un accident similaire causé par un camion transportant un engin forestier sur l'autoroute Sherwood Park en 2025.

Bien que l'étude de l'impact des véhicules sur les piles de ponts soit généralement évoquée dans les articles s'intéressant aux collisions entre les véhicules et les infrastructures routières, la question des impacts des véhicules sur les tabliers de pont a été moins étudiée dans la littérature scientifique. En cause, les collisions de véhicules sur les piles de pont sont plus susceptibles de provoquer l'effondrement total du pont. Ce constat est visible dans les normes internationales portant sur les ouvrages routiers, notamment au Canada et aux États-Unis, où les normes en vigueur portent seulement sur les piles de pont. En revanche, une norme sur les impacts de véhicules sur les tabliers de pont a été introduite en Europe dans l'Eurocode en 2008.

1.2 Objectifs de recherche

Face à cette problématique, les objectifs suivants feront l'objet de cette présente étude :

- Analyser le mécanisme de choc dur / choc mou grâce à des modèles numériques d'éléments finis simplifiés
- Effectuer une analyse paramétrique d'un impact de véhicule sur un pont à l'aide d'un modèle numérique simplifié
- Intégrer le comportement non-linéaire d'une collision de véhicule sur un tablier de pont à l'aide d'un modèle numérique préliminaire s'approchant de la réalité
- effectuer une comparaison préliminaire des valeurs de la force d'impact obtenues avec la norme de l'Eurocode

1.3 Plan du mémoire

Le mémoire comprend cinq chapitres. Le premier chapitre sert d'introduction, présente les différents enjeux de la présente étude, des éléments de la problématique, et passe en revue les objectifs de la recherche. Le deuxième chapitre expose les différentes études réalisées auparavant afin d'introduire des notions utiles à l'étude, ainsi que les hypothèses de base. Le troisième chapitre présente les notions de contact dans les logiciels d'éléments finis utilisés, ainsi que différents résultats provenant d'un modèle simplifié de contact. Dans le quatrième chapitre, un modèle préliminaire réaliste est introduit afin d'étudier avec plus de détails le phénomène d'impact d'une excavatrice montée sur un camion heurtant un tablier de pont. Finalement, le cinquième chapitre permet de conclure l'étude et propose des recherches futures.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Dans cette introduction, une courte présentation des phénomènes physiques et mécaniques survenant lors d'une collision entre un objet et une structure sera effectuée, pour ensuite donner un aperçu des différentes normes existantes au Canada, aux États-Unis et en Europe concernant ces types d'accidents. Par la suite, une revue des différentes études liées aux impacts de véhicules sur les poutres en béton et en acier sera faite, en s'appuyant sur diverses analyses expérimentales et numériques. Finalement, l'aspect énergétique de la collision de véhicules sur les tabliers de pont sera discuté et quelques solutions proposées dans la littérature seront mises en avant.

2.2 Analyse statistique des accidents entre les véhicules et les ponts/tabliers de pont

Dans un rapport d'Agrawal A.K. et Chen C. [19] s'appuyant sur les données collectées par Fu et al. (2003) [20], il est exposé qu'entre 1995 et 2000, une hausse de 81 % d'accidents liés au dépassement de la limite maximale de hauteur de véhicule a été observée dans l'État du Maryland aux États-Unis.

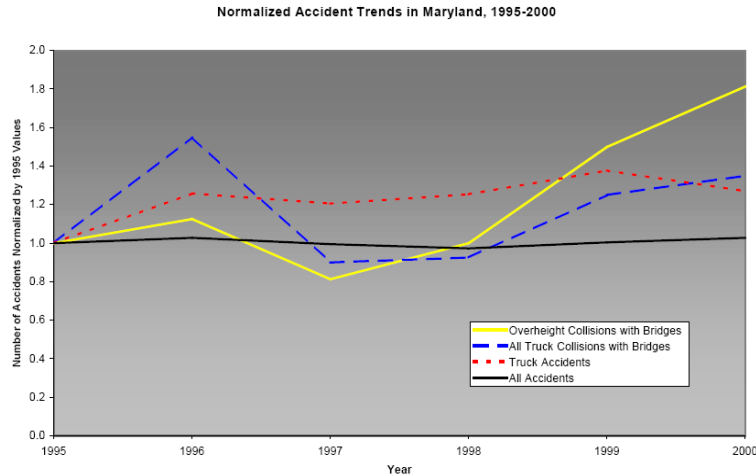


FIGURE 2.1 Fréquence d'accidents survenus sur des ponts dans le Maryland entre 1995 et 2000 et par rapport à l'année 1995, Agrawal et al. (2008)

Concernant le type de structure le plus fréquemment impliqué dans les collisions entre les véhicules surdimensionnés, il ressort que les ponts à cadre rigide sont ceux qui ont connu le plus d'accidents de ce type, suivis par les ponts à poutres.

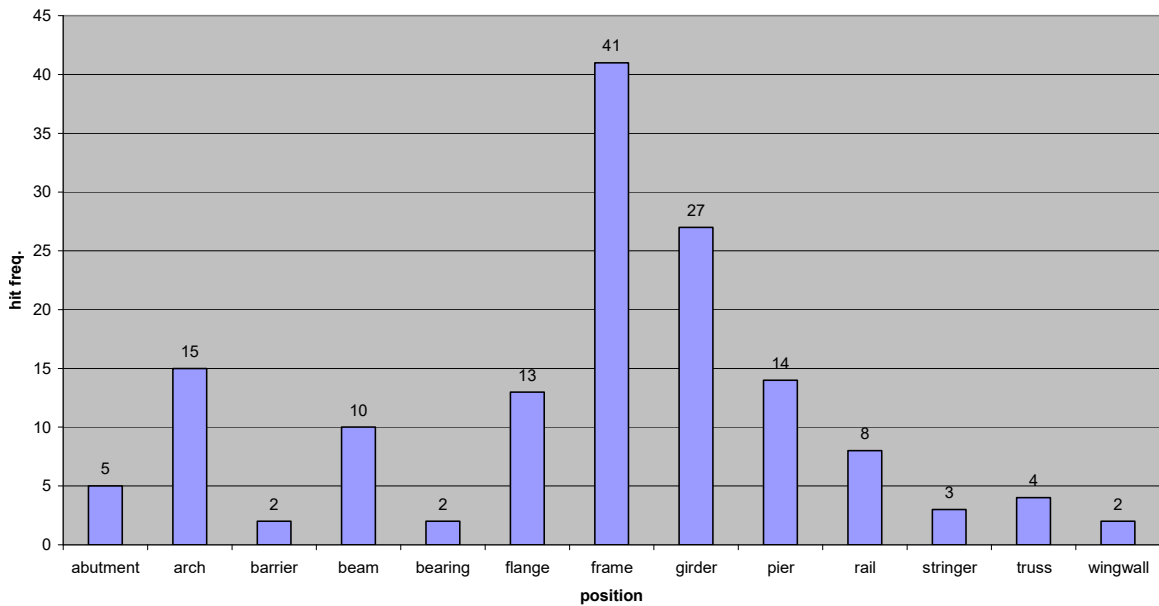


FIGURE 2.2 Nombre de collisions observées sur des ponts en fonction du type d'élément du pont, Agrawal et al. (2008)

Le transport d'engins ou de matériel est bien souvent la situation la plus récurrente lors d'une collision de véhicule et son chargement avec un tablier de pont, comme l'a montré le NYSDOT. En effet, d'après un nombre restreint de données récoltées par le NYSDOT entre 1993 et 2008, sur 77 collisions de semi-remorque sur les tabliers de pont, 29 sont dues à un chargement d'équipement de construction [19], ce qui en fait la principale situation identifiée.

Martin & Mitchell (2004, cité par Agrawal et al., 2008) [19], ont rapporté plusieurs résultats d'une enquête portant sur les différents facteurs menant aux collisions de véhicules sur les ponts appartenant au National Rail, le réseau britannique de voies ferrées. La méconnaissance de la hauteur du véhicule, la mauvaise planification du trajet par les conducteurs et la signalisation inadéquate à l'approche des structures sont les trois principales causes de collision sur les ponts de faible hauteur.

2.3 Bases théoriques

Afin de mieux comprendre le mécanisme derrière les accidents de véhicules sur les structures, il est pertinent de s'intéresser aux phénomènes physiques clés qui gouvernent le choc.

D'après le principe de conservation de l'énergie, lorsqu'un véhicule entre en collision avec une structure, l'énergie cinétique accumulée par le véhicule en mouvement se transforme en énergie de déformation, mais aussi en énergie de friction, ou même en chaleur.

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.1)$$

La principale transformation d'énergie se fait au travers de l'énergie cinétique se dissipant en déformant la structure, mais également le véhicule. Quand la rigidité de la structure est bien supérieure à celle du véhicule, comme c'est généralement le cas pour les véhicules légers, la déformation se produit faiblement dans la structure, mais fortement dans le véhicule. Cependant, dans une situation où la masse, la vitesse ou bien la rigidité du véhicule sont considérablement augmentées, de plus importantes déformations peuvent être attendues sur la structure, comme c'est le cas lorsqu'un poids lourd percute un pont.

2.3.1 Principe de force statique équivalente

Afin de simplifier l'étude d'un impact, la charge dynamique peut être transformée en une force statique équivalente, ce qui permet de simplifier la conception des structures. La détermination de la force statique équivalente se fait en estimant une force susceptible de produire les mêmes effets dans la structure que la charge dynamique [1], dont l'intensité varie en fonction du temps.

2.3.2 Principe de résistance des matériaux sous les charges accidentelles

Les accidents sont caractérisés par une charge importante et très courte sur l'objet impacté, produisant des effets dynamiques importants dans les matériaux. Un paramètre clé permettant de caractériser la résistance d'un matériau sous une charge dynamique est sa vitesse de déformation (strain rate), qui s'exprime comme la dérivée temporelle de la déformation.

2.3.3 Déformations élastiques/plastiques

Les matériaux utilisés dans la conception des structures routières suivent la loi de Hooke constitutive des matériaux, régissant leur comportement lorsqu'ils sont soumis à des charges mécaniques.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.2)$$

avec σ la contrainte normale et ε la déformation axiale.

La déformation élastique est réversible, et la structure retrouve sa forme initiale lorsque la charge n'est plus appliquée. À l'inverse, la déformation plastique est irréversible, et survient lorsque la limite d'élasticité est dépassée.

2.3.4 Non-linéarité des matériaux

Du fait des grandes déformations qui peuvent avoir lieu lors d'une collision sur une structure, les matériaux sujets à la déformation peuvent s'écarter d'une réponse linéaire suivant la loi de Hooke et adopter un comportement non-linéaire. De plus, les structures composées de plusieurs matériaux différents (béton, acier) connectés entre eux accentuent encore plus le comportement non-linéaire de la structure, à travers notamment la fissuration du béton et le fluage (en considérant par exemple la charge de longue durée dont est soumis un pont) [21].

Lors d'une collision entre un véhicule et un tablier de pont, différents types d'endommagements peuvent être observés, avec différents degrés de risques quant à la sûreté de la structure :

- Dommages locaux
 - Fissuration, écaillage et détachement de fragments de béton
 - Poinçonnement, enfoncement localisé sous l'impact
 - Plastification locale des membrures en acier
 - Éclatement de l'enrobage et exposition des armatures

- Dommages aux armatures
 - Déformation plastique des armatures
 - Rupture des armatures
- Dommages globaux
 - Déflexion permanente (déformation plastique)
 - Flambement des poutres porteuses
 - Cisaillement
 - Plastification puis rupture des éléments structuraux
- Etc.

Des exemples de plusieurs dommages observés après des collisions entre un véhicule et un pont sont montrés à la figure 2.3.



(a) Écaillage du béton, Heidenreich 2025 [22]



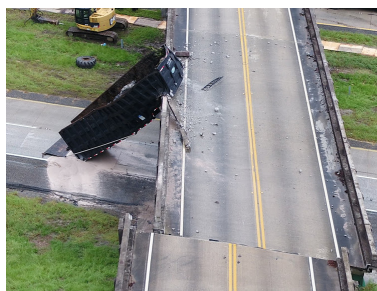
(b) Éclatement de l'enrobage, Bartko 2023 [23]



(c) Déflexion permanente, Braga 2025 [24]



(d) Flambement, Berton 2017 [2]



(e) Cisaillement, Bell 2021 [25]



(f) Plastification puis rupture, Seto 2016 [26]

FIGURE 2.3 Différents dommages observés à la suite de collisions de véhicules sur des ponts

2.4 Normes internationales

2.4.1 Canada (CSA)

Au Canada, le Canadian Standards Association (CSA) ne fournit pas de normes concernant l'impact de véhicules sur les tabliers de pont, mais s'intéresse plutôt aux charges dynamiques contre les piles de pont et les barrières de pont. Plus précisément, un dimensionnement en prenant une force statique équivalente de 1 400 kN est prescrit pour les piles de pont [27].

2.4.2 États-Unis (AASHTO)

Bien que la conception contre les collisions de navires sur les ponts soit détaillée, il n'existe toujours pas dans le code américain de l'AASHTO de prescription particulière concernant les collisions de véhicules sur les tabliers de pont. En effet, il est mentionné qu'un dimensionnement de pont visant à résister aux collisions de véhicules est nécessaire à partir d'une certaine fréquence annuelle d'accidents, déterminée en amont [28]. Cependant, aucune norme de force indicative n'est présente pour les collisions de véhicules sur les tabliers de pont. Toutefois, dans le cas où l'impact de véhicules est à prendre en compte dans la conception, il est mentionné qu'une force statique équivalente de 2 600 kN doit servir au dimensionnement de la pile.

2.4.3 Europe (Eurocode)

Tandis que les codes canadiens et américains ne font pas mention d'une conception contre les collisions de véhicules sur les tabliers de pont, l'article 1.7 de l'Eurocode propose une méthodologie portant sur cette problématique. En effet, le code européen définit deux types de chocs lors des collisions de véhicules sur les infrastructures. Le choc « dur » implique une structure infiniment rigide avec un véhicule considéré comme « souple ». Dans cette situation, l'énergie due à l'impact est dissipée par déformation plastique du véhicule, comme il est généralement question lors d'une collision entre un véhicule et un pont. Le choc « mou », à l'inverse, considère que le véhicule impactant est infiniment rigide et que la structure possède des propriétés élastiques-plastiques, entraînant ainsi la dissipation d'énergie par déformation dans la structure. Ce cas reflète la situation où la structure est conçue pour se déformer face à l'impact, comme par exemple les éléments de type « fusible » permettant de limiter les dégâts sur les véhicules.

L'Eurocode prescrit une force de conception statique équivalente de 500 kN pour les axes routiers principaux, comme montré au tableau 2.1.

TABLEAU 2.1 Forces indicatives de l'Eurocode pour les impacts de véhicule sur les structures en fonction du type de route, Eurocode [1]

Catégorie de trafic	Force statique équivalente de conception F_{dx} (kN)
Autoroutes et routes nationales	500
Routes de campagne	375
Routes en ville	250
Parkings	75

Dans l'annexe C de l'Eurocode 1.7, plusieurs points sont abordés plus en détail concernant la conception dynamique des superstructures. En effet, bien qu'il soit indiqué que la conception avancée d'ouvrages routiers nécessite de prendre en compte à la fois le comportement dynamique et les effets non linéaires des matériaux lors de l'impact, seul l'aspect dynamique est considéré pour les modèles utilisés pour la conception de l'Eurocode. De plus, la force de dimensionnement spécifiée concerne seulement le camion et non l'impact du chargement, susceptible d'entrer en contact avec la structure dans un second temps en raison de son inertie [6].

Choc dur

A l'aide de modèles simplifiés et empiriques de collisions, l'Eurocode fournit une formule permettant de rapidement déterminer le pic de force de contact au moment de l'impact.

$$F = v \sqrt{k m} \quad (2.3)$$

où v est la vitesse de l'objet impactant, k sa rigidité et m sa masse.

Choc mou

Dans le cas d'un choc mou, l'équation (2.3) est toujours valide mais en prenant soin de considérer le terme k comme étant la rigidité de la structure. Il est également suggéré d'effectuer la conception de l'ouvrage en tenant compte de sa ductilité, telle que la structure soit capable d'absorber l'énergie cinétique de l'objet impactant.

2.5 Études sur les impacts de véhicule sur les piles de pont

La modélisation numérique de l'impact de véhicules lourds sur les piles de pont est un sujet récurrent dans la recherche sur les charges extrêmes sur les ponts, étant donné l'importance structurelle des piles de pont. Par exemple, Heng et al. (2022) [29] ont modélisé sur le logiciel LS-DYNA la collision d'un camion avec une pile de pont. Les auteurs ont remarqué après avoir obtenu les résultats numériques que les forces d'impact présentaient deux pics de force : un pour la collision initiale de l'avant du camion avec la pile de pont, l'autre étant dû au choc du chargement à cause de l'arrêt brutal du véhicule. Le deuxième impact est plus faible en amplitude étant donné que le chargement, constitué d'un conteneur, a une rigidité plus faible que le camion, dont la masse et la rigidité sont principalement portées par le bloc moteur du camion.

Bien que de nombreuses études aient été conduites ces dernières années pour étudier expérimentalement et numériquement l'impact de véhicules sur des structures en béton armé, une minorité s'intéresse aux collisions de véhicules sur les tabliers de pont [30].

2.6 Études sur les impacts de véhicule sur les tabliers de pont

Un article récent de Mraih et al. (2025) [31] a souligné la sous-estimation des normes actuelles en matière de collision entre des véhicules et les tabliers de pont. En effet, il a été mis en lumière que les codes de conception s'appuient principalement sur un design basé sur les forces statiques équivalentes, tandis que le comportement dynamique des structures face aux impacts de véhicules est peu pris en compte. À l'aide d'une étude croisée avec différentes normes et articles scientifiques s'intéressant aux collisions entre les véhicules et les ponts, les auteurs ont conclu sur la corrélation des différents résultats obtenus des articles, ce qui montre effectivement l'importance de réévaluer les normes portant sur les collisions véhicule/structures en s'intéressant au comportement dynamique des structures.

Les progrès effectués dans le domaine du génie civil, notamment avec le développement de modèles analytiques et de logiciels d'éléments finis plus avancés et permettant de modéliser avec plus de précision et réalisme les comportements des structures sous différentes charges, ont permis d'étudier de façon plus pertinente les sujets liés au génie civil. En s'appuyant sur des tests expérimentaux, la modélisation numérique permet de valider ou bien d'approfondir les problématiques telles que l'impact des véhicules sur des poutres en béton ou en acier.

2.6.1 Impact sur les poutres en béton

Dans un premier lieu, plusieurs études expérimentales et numériques concernant les collisions sur les poutres en béton vont être présentées.

Études expérimentales

D'après Y. Jing et al. (2016) [5], les études expérimentales concernant les collisions de véhicules sur les superstructures ont dans un premier temps utilisé des masses jetées d'une certaine hauteur sur des modèles de pont dans le but de recréer la force d'impact. Cette expérience, simple à réaliser dans un laboratoire, ne semble cependant pas refléter la réalité. En effet, en appliquant la charge d'impact parallèlement à la gravité et non pas latéralement comme c'est le cas pour les collisions sur les ponts, cette méthode surestime la force d'impact et cause plus d'endommagement que lors d'un impact dû à un accident réel. Pour ce faire, les auteurs ont décidé de construire un modèle à l'échelle réelle 1 :1 d'une collision d'un véhicule sur une poutre en béton précontraint pour étudier son comportement sous une charge d'impact.

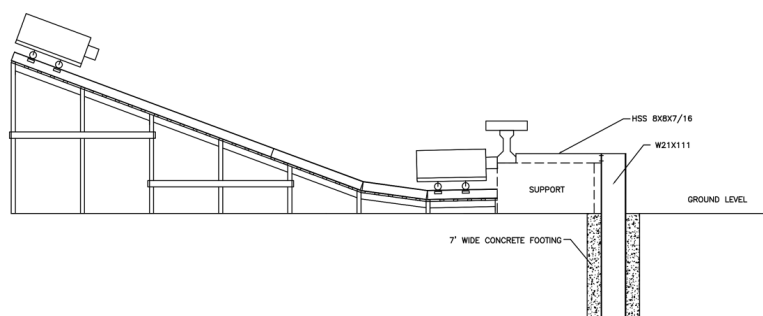


FIGURE 2.4 Étude expérimentale utilisant une masse jetée, Jing (2016) [5]

Pour ce faire, Jing et al. ont lâché depuis une rampe un chariot de 4 082 kg monté sur des rails et dont la course se termine avec la collision d'une poutre en béton précontraint. Après avoir atteint la vitesse maximale de 6.86 m/s (24.7 km/h), le chariot atteint la poutre avec une force maximale de 4 622 kN, soit une force bien plus grande que celle prescrite par l'Eurocode (500 kN). Les dommages observés sur la poutre peuvent être interprétés comme un cisaillement par poinçonnement, résultant de la rigidité élevée du chariot.

Pour conclure, les auteurs soulignent le fait que la rigidité de la zone de contact joue un rôle déterminant quant à la caractérisation de l'amplitude et de la durée de la force de collision.

Dans une autre étude, K. Oppong et al. (2020) [6] s'est intéressé à l'impact de différents objets contre deux superstructures issues de l'AASHTO, des poutres en béton de type I et IV. À l'aide du logiciel d'éléments finis LS-DYNA ont été modélisés un semi-remorque et divers objets tels qu'un conduit en béton, un conteneur en acier, un tuyau en PVC et un conteneur en bois afin d'étudier le comportement des poutres en béton lors de leur collision. Les résultats ont montré une force maximale d'impact de 4 800 kN dans la situation où le véhicule a une vitesse de 72 km/h. De plus, les auteurs ont noté des déformations plastiques au-dessus de la zone d'impact, ce qui est cohérent avec les dommages observés dans la réalité lors d'accidents impliquant des véhicules surdimensionnés entrant en collision avec un tablier de pont, d'après un sondage réalisé sur de nombreux ponts [32].

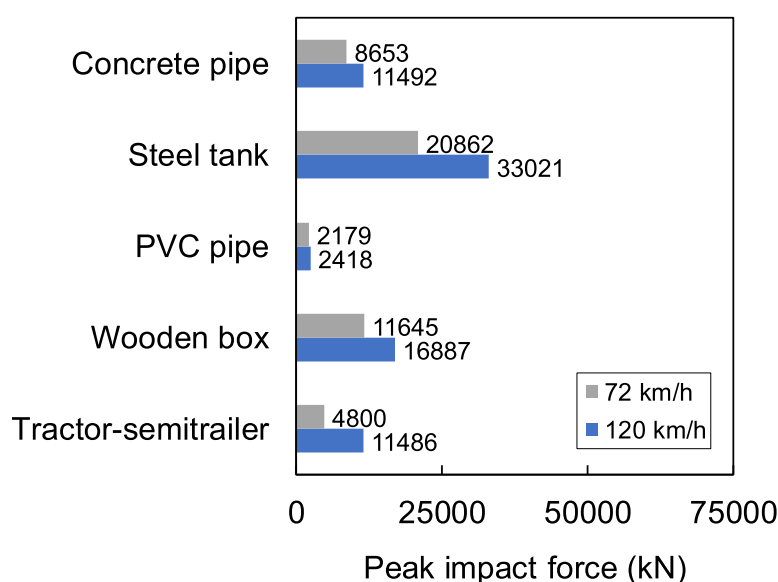


FIGURE 2.5 Comparaison des forces d'impact de différents objets, Oppong (2020) [6]

Études numériques

Compte tenu de la difficulté et du coût des tests expérimentaux à échelle réelle d'une collision de véhicule sur les poutres de tabliers de pont, de nombreuses études font appel aux logiciels d'éléments finis pour recréer ces collisions numériquement.

Dans ce contexte, Xu et al. (2013) [7] ont étudié la collision entre un camion surdimensionné en hauteur et un tablier de pont à l'aide du logiciel de modélisation MSC.MARC, représentée à la figure 2.8 Pour cette étude, les auteurs ont modélisé numériquement un pont à poutre en T en béton précontraint, un pont mixte acier-béton et un pont à caisson en béton précontraint.

Plusieurs tests ont été menés avec différents types de véhicules (camion conteneur, camion benne, camion-citerne) et différents paramètres ont été identifiés comme les principaux facteurs d'impact, dont notamment la vitesse du véhicule, linéairement corrélée avec l'amplitude de la force. Après avoir effectué plusieurs simulations de collision avec différentes formes de camions de même masse, les auteurs ont obtenu des forces résultantes toutes différentes, en raison de leurs structures variées. D'autre part, il est dit que les paramètres liés au pont n'ont pas beaucoup d'influence sur la force de collision du véhicule. Les auteurs ont conclu que les dommages observés sur des tabliers de ponts impactés par des véhicules surdimensionnés proviennent d'une déformation globale de la structure ainsi que d'un poinçonnement local, qui doivent être tous les deux pris en compte lors de la conception. Un autre point important concernant la modélisation en éléments finis de la collision est que les frictions entre le camion et le pont ainsi qu'entre les roues du camion et la route peuvent être négligées.

D'autre part, une étude de Kong et al. (2020) [8] a analysé le modèle numérique d'une collision entre un camion et un tablier de pont en caisson en béton précontraint à l'aide du logiciel LS-DYNA. Plusieurs cas d'impact ont été définis en s'intéressant aux variables suivantes : vitesse du véhicule, masse du véhicule, hauteur de l'impact, résistance en compression du béton. Les tests ont été menés pour identifier les paramètres ayant un fort impact sur la force de contact, et il en est ressorti que la vitesse du véhicule est celui qui influence le plus la valeur maximale de la force d'impact. De plus, il s'est avéré que les dommages locaux sont les dommages prédominants lors de la collision avec le camion. Un échantillon des résultats obtenus sont présentés à la figure 2.9.

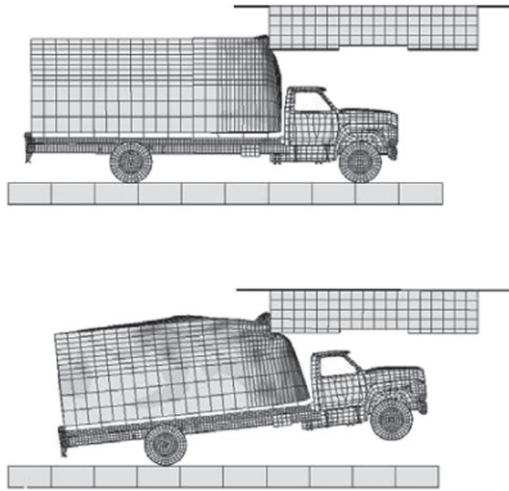


FIGURE 2.6 Modélisation numérique de l'impact

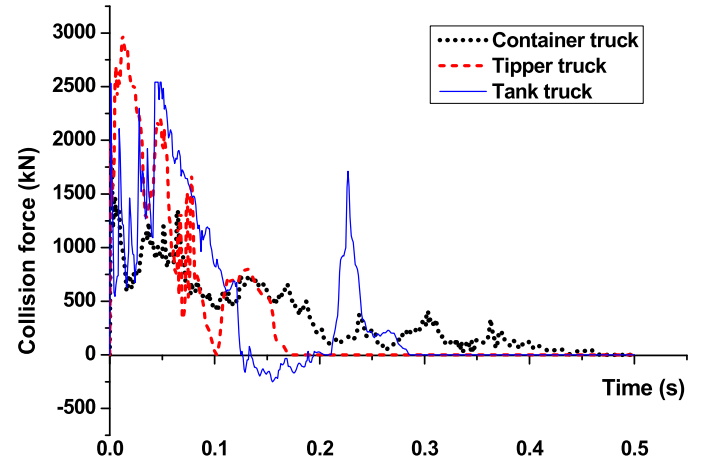


FIGURE 2.7 Force de collision obtenue

FIGURE 2.8 Force de collision obtenue à l'aide du logiciel MSC.MARC par Xu et al. [7]

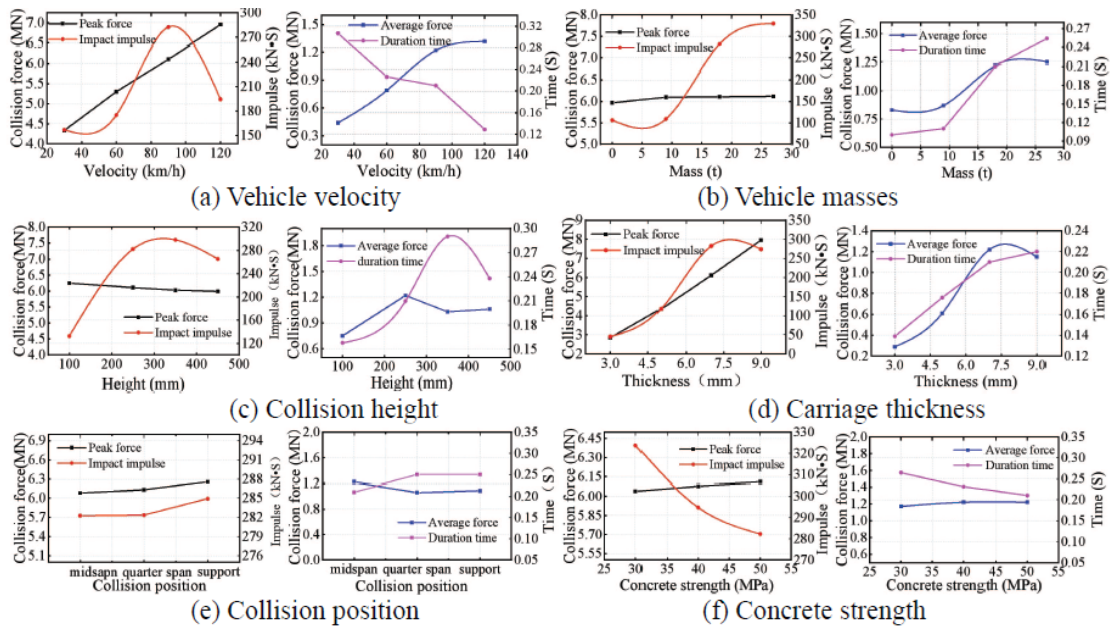


FIGURE 2.9 Analyse paramétrique de certaines propriétés pouvant influencer la force de contact, Kong 2020 [8]

Les résultats ont pu être comparés avec des valeurs expérimentales. Encore une fois, le mode de rupture principal observé est un poinçonnement local, en accord avec les dommages rapportés dans les études similaires.

2.6.2 Impact sur les poutres en acier

D'après Mraih et al. (2025) [31], les poutres en acier sont davantage sujettes aux dommages globaux, tandis que des dommages locaux sont principalement observés sur les poutres en béton armé. Après avoir passé en revue différentes études expérimentales et numériques sur les impacts sur les poutres en béton, il est intéressant de comparer les résultats obtenus avec ceux des poutres en acier, étant donné qu'en raison de leurs propriétés mécaniques différentes, un comportement distinct est à prévoir.

Études expérimentales

Dans une étude conduite par Ozdagli et al. (2020) [9], une masse a été installée au bout d'un pendule afin de s'intéresser au choc entre une poutre en acier et la masse lâchée depuis une certaine hauteur, permettant ainsi de recréer expérimentalement la collision entre un objet lourd et à haute vitesse à échelle réduite 1 :5 .

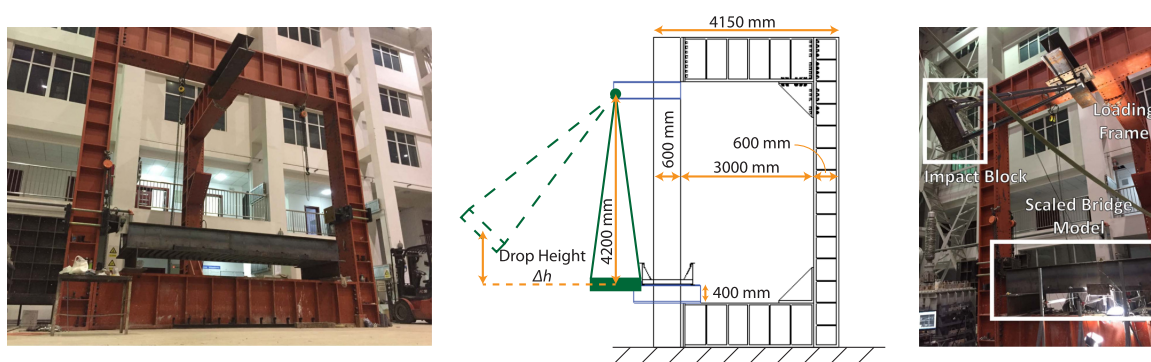


FIGURE 2.10 Étude expérimentale utilisant une masse attachée au bout d'un pendule, Ozdagli (2020) [9]

L'auteur a également mené des tests en ajoutant des poutres de protection contre les collisions (« crash beams »). Après avoir obtenu les résultats des tests avec différentes charges d'impact, Ozdagli et al. ont conclu qu'en général, les poutres de protection contre les collisions

permettent d'atténuer les déplacements permanents résultant du choc, d'environ 50 % à 70 % par rapport au cas où les poutres de protection ne sont pas présentes. De plus, les poutres de protection moins résistantes et moins soudées à la poutre principale sont plus efficaces pour atténuer les déplacements permanents plutôt que celles d'une poutre plus résistante. Les auteurs ont finalement noté qu'il est important de concevoir les ponts après avoir conduit des estimations de force d'impact de crash sur les poutres.

Études numériques

Après s'être intéressés aux impacts sur les poutres en béton (Oppong et al. 2020), les auteurs se sont ensuite penchés sur l'impact des poutres en acier Oppong et al. (2024) [10]. Dans cette étude, un conduit en béton, un réservoir en acier et un semi-remorque avec son chargement ont été modélisés comme objets impactant une structure composée de 5 poutres en acier, dont le design provient de la Federal Highway Administration (FHWA). Les auteurs ont pu remarquer des résultats numériques assez proches du comportement des poutres en acier sous des charges accidentelles, notamment pour les dommages. En effet, les modes de rupture principaux obtenus dans les modèles numériques sont la déformation hors-plan et le flambement des poutres accidentées.

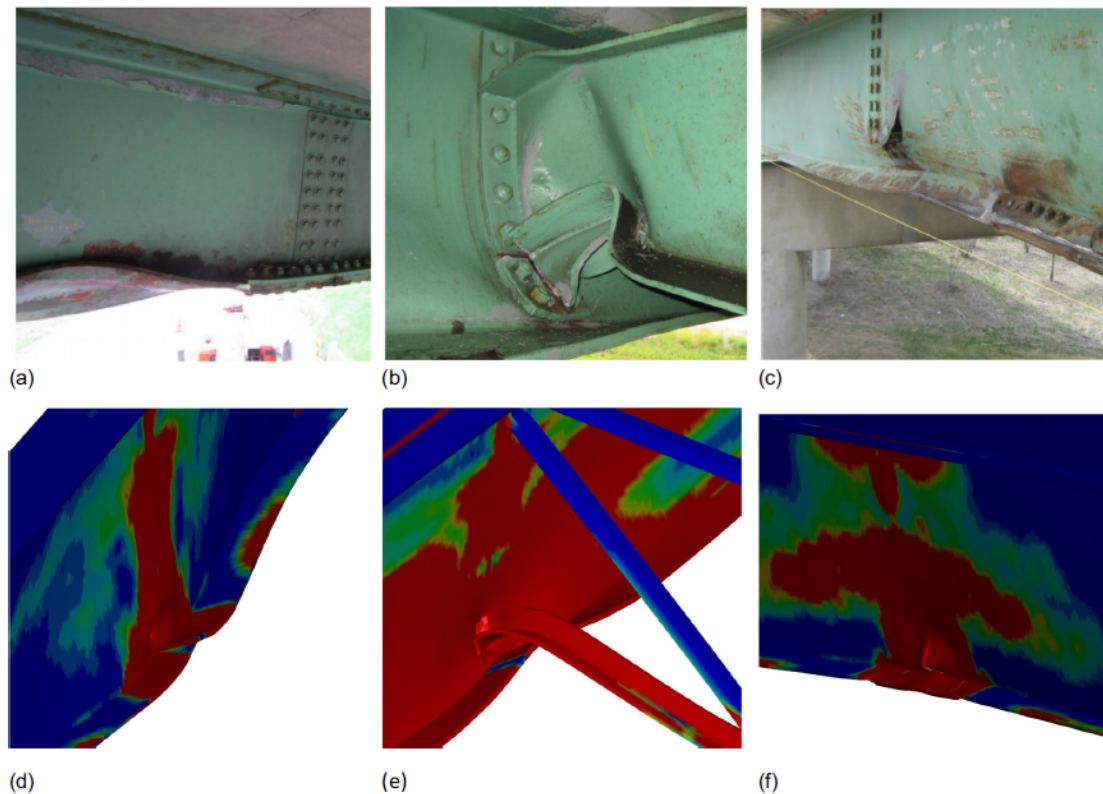


FIGURE 2.11 Dommages observés sur des poutres en acier, dans la réalité et numériquement, Oppong 2024 [10]

Berton et al. (2017) [2] ont proposé un modèle en éléments finis de l'impact entre une excavatrice et un tablier de pont sur le logiciel ADINA. Pour ce faire, les auteurs ont modélisé numériquement les deux cas d'impact présents dans l'Eurocode, le choc mou et le choc dur. Pour le choc mou, le modèle consiste en un camion simplifié dont la partie entrant en contact avec le pont a été rendue rigide. La géométrie du véhicule a été modifiée pour limiter les temps de calcul, en intégrant des liens rigides entre les différents éléments (masse concentrée, surface de contact de la pelle et plateau du camion) pour garantir la validité du modèle. La partie de la pelle entrant en contact avec le tablier de pont a été attachée avec des liens rigides au plateau du camion afin de considérer l'effet de levier engendré lors de la collision. Le véhicule est défini par 5 masses ponctuelles : une placée au même niveau que la plaque d'impact, représentant 20% de la masse totale du véhicule, et 4 autres masses positionnées aux coins du plateau du camion, représentant 80% de la masse du système { camion + excavatrice }.

Le pont est modélisé comme une dalle rectangulaire, dont les appuis sont considérés comme parfaitement encastrés. Ce dernier a été maillé de façon géométrique progressive, avec de plus petits éléments au niveau de la zone d'impact et de plus gros éléments dans la partie la moins affectée par les effets de la collision. Les non-linéarités des matériaux ont été négligées (fissuration, écrasement, taux de chargement du béton...).

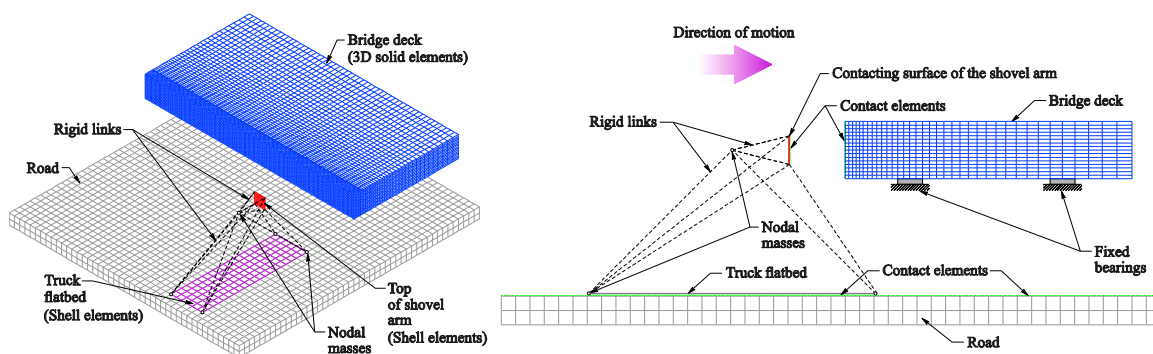


FIGURE 2.12 Modèle numérique d'une collision entre un camion chargé d'une excavatrice sur un tablier de pont, Berton (2017) [2]

Après avoir mené une analyse paramétrique sur la vitesse du véhicule, la masse du véhicule, la rigidité latérale du tablier du pont et le paramètre caractérisant la « dureté du contact » (contact surface compliance ou "compliance"), Berton et al. (2017) [2] ont soulevé le fait que les paramètres de contact jouent un rôle important dans le comportement du modèle lors de l'impact. En effet, plus la "compliance" est faible, plus la force d'impact est grande et plus la durée d'impact est courte.

De plus, les auteurs ont remarqué que la masse du pont n'a pas d'influence sur la force d'impact, tandis que concernant la masse du véhicule, la force de contact est "approximativement multipliée par $\sqrt{\alpha}$ lorsque la masse du véhicule est multipliée par α ." [11]. D'autre part, la durée d'impact augmente lorsque la masse du véhicule augmente. Enfin, "La force maximale de contact augmente linéairement avec la vitesse du véhicule." [11], mais n'influence pas la durée d'impact.

Berton (2021) [11] a modélisé un choc dur, donc un véhicule élastique entrant en collision avec un pont infiniment rigide. Étant donné que des déformations sont attendues au niveau de la pelle de l'engin, cette partie a été modélisée avec plus de détail ; toutefois, seules les parties les plus soumises aux effets de l'impact ont été gardées, soit la flèche et une partie du balancier de la pelle.

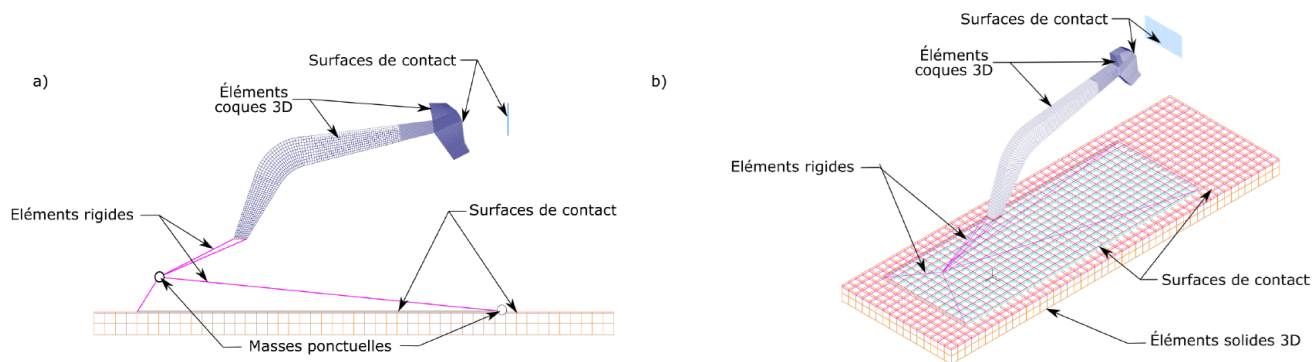


FIGURE 2.13 Modèle numérique du choc dur, Thèse de Berton 2021 [11]

Concernant les propriétés du modèle, une valeur 0.5 est retenue pour le coefficient de friction entre la partie impactante de la pelle d'excavatrice et le pont, tandis qu'un coefficient de friction de 0.2 est appliqué entre les différents éléments du balancier.

Après résultats de l'analyse, l'auteur a obtenu une force de contact de 2 055 kN, bien plus que la force statique équivalente prescrite par l'Eurocode. En conclusion de cette étude, Berton (2021) [11] expose les limites du modèle tout en suggérant des pistes d'amélioration pour les travaux futurs. Notamment, l'ajout des effets non-linéaires et l'étude de l'influence du taux de chargement seraient à explorer.

2.6.3 Études énergétiques d'impact

En parallèle des études basées sur les forces de contact de design, plusieurs articles se sont intéressés à l'analyse énergétique des collisions, tel que Yang et al. (2010) [33] qui ont proposé une méthodologie analytique de conception pour les systèmes de protection des ponts contre les impacts de véhicules. Dans leur analyse, les auteurs ont observé que pour la conception des systèmes d'absorption des chocs, l'impact peut être décomposé en trois phases : d'abord l'impact élastique, puis l'impact élastique-plastique et enfin l'impact après densification du matériau d'absorption.

2.7 Conclusions préliminaires

D'après les articles passés en revue, il semble que toutes les études montrent que la force de collision d'un véhicule sur un tablier de pont est sous-estimée par les prescriptions de l'Eurocode, qui propose une force indicative de 500 kN [1]. Les différents résultats peuvent être retrouvés dans le tableau suivant :

TABLEAU 2.2 Tableau récapitulatif des différentes forces de contact obtenues dans la littérature lors d'une modélisation numérique d'une collision

Article	m (kg)	v (km/h)	F_{max} (kN)	Type de camion	Type de pont
Oppong (2020)	14 061	72	4 800	Freightliner FLD120	Poutres en béton
Xu (2013)	10 000	60	2 950	Camion-benne	Poutres en T en béton précontraint
Kong (2020)	18 000	30	6 110	Camion Semi-Remorque	Caisson en béton précontraint
Cao (2021)	27 000	64	3 250	Camion Semi-Remorque	Treillis en acier

2.8 Solutions proposées et recommandations

Face à ces nombreuses conclusions sur l'importance de protéger les ponts face aux collisions de véhicules, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature.

Notamment, Mraih et al. (2025) [31] évoquent les options suivantes :

- Déviation de la route vers un itinéraire supportant les véhicules de grande hauteur
- Signalétique d'avertissement en amont du pont (laser...)
- Augmentation de la hauteur libre sous le pont
- Portiques de gabarit
- Systèmes d'absorption de choc

L'utilisation de systèmes de protection contre les chocs a été une autre fois appuyée par Cao et al. (2021) [34] à travers la modélisation numérique du pont de la rivière Skagit, qui s'est effondré en 2013 après qu'un camion dépassant la limite de hauteur prescrite ait percuté une poutre en acier. L'auteur conclut sur le fait que l'accident aurait pu être limité avec l'utilisation d'un système de protection contre les chocs tel qu'une poutre sacrificielle aux extrémités du pont.

Pour les collisions sur les ponts à cadre rigide, une étude de Horberry et al. [12] a montré que la signalétique du cadre influence la perception de la hauteur du pont des conducteurs, et par conséquent la prise de décision de traverser sous le pont ou non. L'expérience consiste à demander à plusieurs participants d'estimer à des distances progressives s'ils pouvaient franchir un faux pont ou non avec différentes hauteurs libres et signalétiques.

Les participants ont ensuite dû noter sur une échelle leur perception du risque associé au franchissement du pont, 1 correspondant au fait que le participant est convaincu qu'il va le percuter, 3 correspondant à la situation où le participant pense éventuellement qu'il va percuter le pont. Après avoir analysé les résultats, les auteurs ont montré qu'un changement de signalétique peut grandement influencer le risque de collisions sur un pont.

(1 correspond au résultat si le participant est convaincu qu'il va percuter le pont, 3 correspond au résultat si le participant pense éventuellement qu'il va percuter le pont)

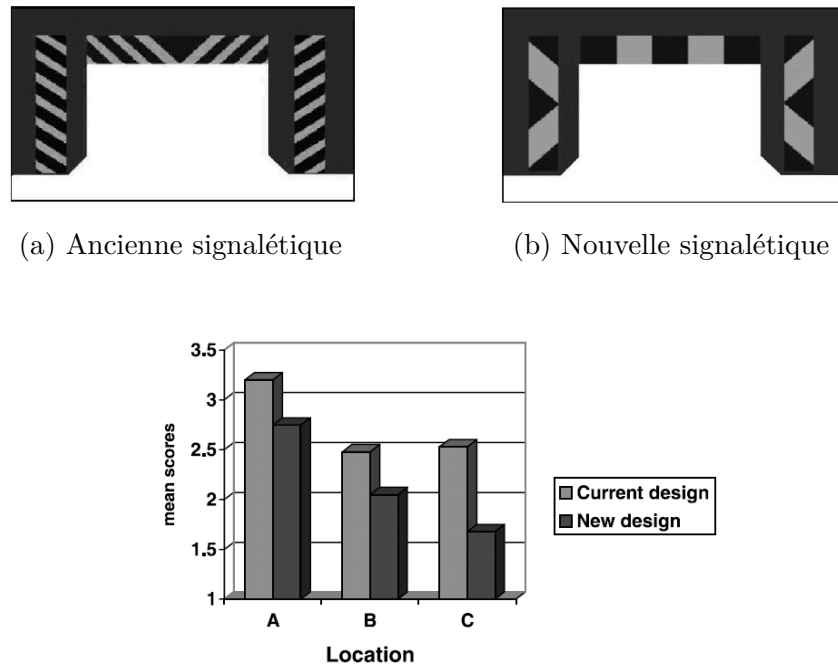


FIGURE 2.14 Résultat de l'étude sur le comportement des participants , Horberry 2002 [12]

Dans la perspective d'estimer la charge de service d'un pont suite à un accident, les travaux de Tabatabai et al. (2022) [35] ont proposé une méthodologie analytique pour évaluer la perte d'intégrité et pour actualiser la charge de service du pont à la suite d'une collision entre un camion surdimensionné et des poutres en béton précontraint. Les résultats, qui ont ensuite pu être testés avec l'aide des éléments finis, ont montré une corrélation suffisante entre les valeurs analytiques et numériques.

2.9 Lacunes dans ce domaine

Malgré le développement de logiciels numériques d'éléments finis permettant de modéliser avec plus de précision les aléas pouvant survenir sur les différents éléments des ponts, de nombreuses questions pourraient être étudiées avec davantage d'approfondissements afin de proposer une norme de construction sécuritaire.

CHAPITRE 3 MODÉLISATION SIMPLIFIÉE DE L'IMPACT ENTRE UN VÉHICULE ET UN TABLIER DE PONT

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, une étude préliminaire d'un modèle simplifié représentant de manière approximative la collision entre un camion et un tablier de pont sera effectuée. Un objectif principal est de déterminer les hypothèses et les différents paramètres entrant en jeu lors de la modélisation numérique du contact en utilisant les logiciels d'éléments finis ADINA (formulation implicite) et LS-DYNA (formulation explicite). Une analyse paramétrique sera réalisée sur le modèle afin d'identifier les principaux facteurs influençant les résultats. Au préalable, l'expression analytique proposée par l'Eurocode (2.3) pour estimer la force d'impact est revue.

3.2 Estimation de la force d'impact d'un véhicule sur une structure de pont selon l'Eurocode

Deux types de collisions véhicule-pont sont considérés dans l'Eurocode : (i) le choc mou, au cours duquel l'énergie de l'impact est dissipée essentiellement par l'ouvrage déformable (le véhicule est supposé rigide dans ce cas). et (ii) le choc dur, au cours duquel l'énergie de l'impact est dissipée essentiellement par le véhicule déformable (le pont est supposé rigide dans ce cas).

Considérons le cas d'un choc mou. La formulation simplifiée de l'impact repose sur l'hypothèse que l'énergie cinétique E_c du véhicule rigide est totalement convertie en énergie de déformation E_d de la structure déformable

$$E_c = E_d \tag{3.1}$$

L'énergie cinétique E_c est donnée par

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \tag{3.2}$$

où m et v représentent la masse et la vitesse du véhicule à l'impact. En supposant que la structure peut être modélisée par un ressort de raideur k , l'énergie de déformation E_d de

l'ouvrage s'exprime par

$$E_d = \frac{1}{2} F \delta \quad (3.3)$$

où F est la force statique équivalente à l'impact et δ le raccourcissement du ressort (c'est-à-dire la déformation de l'ouvrage).

Or, la force F est également reliée au déplacement δ par la raideur k du ressort, sous l'hypothèse d'un comportement linéaire élastique

$$F = k \delta \quad (3.4)$$

Les équations (3.2), (3.3) et (3.4) mènent à l'expression

$$F = v \sqrt{k m} \quad (3.5)$$

qui est prescrite par l'Eurocode pour évaluer approximativement la force d'impact d'un véhicule sur une structure. Cette expression peut être adaptée au cas d'un choc dur en utilisant la rigidité du véhicule.

3.3 Modélisation des impacts dans les logiciels d'éléments finis

La méthode des éléments finis est largement utilisée pour modéliser les effets des impacts entre véhicules et obstacles. Cette utilisation requiert la disponibilité de machines disposant d'une grande puissance de calcul pour permettre la résolution de ces problèmes complexes dans des délais raisonnables et de manière fiable. Cependant, la modélisation numérique seule de la réponse d'impact n'est pas suffisante, une comparaison avec des essais expérimentaux est généralement requise pour valider les solutions numériques.

3.3.1 Modélisation numérique : analyses implicite et explicite

Les logiciels d'analyse numérique avec la méthode des éléments finis proposent généralement deux types de résolutions pour les modèles dynamiques : l'analyse implicite et l'analyse explicite.

D'un côté, l'analyse implicite est inconditionnellement stable mais a besoin de plus de temps pour calculer l'itération suivante. L'analyse implicite est à privilégier dans les cas où le problème est quasi-statique avec des charges lentes et progressives. Un pas de temps long peut ainsi être utilisé, mais cela implique que les effets non-linéaires éventuels ne sont pas bien pris en compte.

L'analyse explicite se révèle utile pour les problèmes dynamiques impliquant des phénomènes rapides et intenses comme les impacts, les crashes de véhicules ou les explosions, pouvant générer des effets non linéaires. A l'inverse de l'analyse implicite, l'analyse explicite nécessite de petits pas de temps pour assurer la stabilité de la simulation.

3.3.2 Choix du logiciel de modélisation

Pour les modèles présentés dans ce chapitre, le choix a été fait d'utiliser deux logiciels numériques d'éléments finis, ADINA pour l'analyse implicite et LS-DYNA pour une analyse explicite. Les différentes particularités des deux logiciels sont présentées dans les sections suivantes.

Le logiciel ADINA

Le logiciel ADINA a été initialement développé par Klaus-Jürgen Bathe en 1974 et est principalement utilisé pour des simulations de structures, de mécanique des fluides, de transfert de chaleur et d'électromagnétisme. Seule l'analyse implicite du logiciel ADINA a été retenue pour la modélisation numérique. En effet, ADINA est reconnu pour ses capacités à résoudre implicitement et avec une convergence inconditionnelle les problèmes statiques ou quasi-statiques. La résolution de Bathe va être utilisée pour les modèles ADINA.

Le logiciel LS-DYNA

Le logiciel LS-DYNA a été développé en 1976 par John O. Hallquist au laboratoire national Lawrence Livermore aux États-Unis afin de simuler des modèles d'impacts en 3D. LS-DYNA est généralement utilisé et assez répandu dans la littérature pour la modélisation des crashes de voitures, d'explosions, d'impacts et de charges accidentelles. Un des atouts du logiciel est de traiter avec précision les simulations de phénomènes mécaniques de courte durée et de forte intensité.

3.3.3 Définition du contact dans le logiciel ADINA

Dans le logiciel ADINA en analyse implicite, le contact est défini comme un algorithme permettant de détecter et de contrôler la pénétration d'un nœud "contactant" avec un segment "cible". La direction normale du segment "cible" constitue la direction de la pénétration, tandis que l'intensité du contact se détermine par la distance entre le nœud "contactant" et le segment "cible", dont la longueur est appelée "gap".

Dans le cas d'un contact sans pénétration, la courbe de la force normale de contact par rapport au "gap" se présente telle qu'illustrée à la figure 3.1.

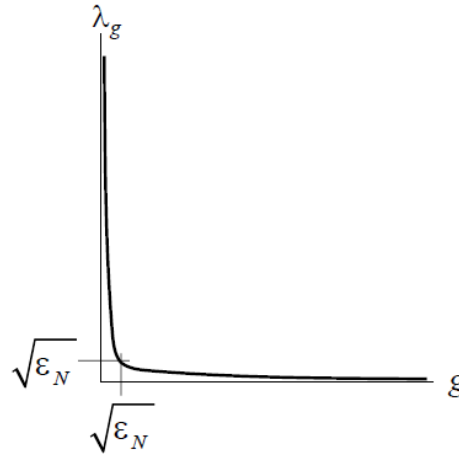


FIGURE 3.1 Contact sans pénétration dans ADINA [13]

où λ_g est la force normale de contact et g est le "gap".

A l'inverse, il est possible d'autoriser une certaine pénétration des nœuds "contactants" avec les segments "cibles" en permettant une certaine "souplesse" du contact. La "souplesse" du contact peut être modifiée à l'aide du paramètre de "compliance". Dans le cas où la pénétration entre le nœud et le segment doit être empêchée, le facteur de compliance doit être nul. Le facteur de compliance est défini comme la pente de la courbe "gap-pression", telle que montrée à la 3.2, où g représente le "gap" et p_g la pression normale du contact par unité de longueur pour un contact en 2D en déformation plane.

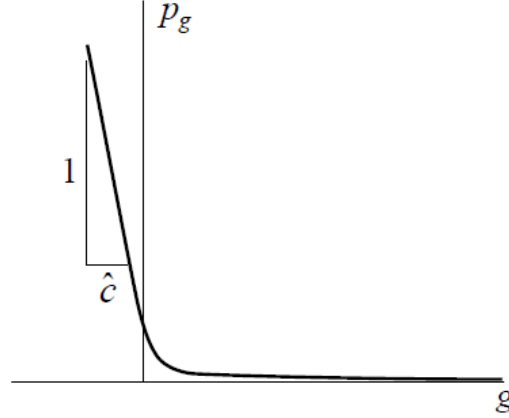


FIGURE 3.2 Contact avec pénétration dans ADINA [13]

La courbe "gap-pressure" est définie par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} p_g &= \frac{1}{\hat{c}} \times (-g), \quad \text{pour } g < 0 \\ &= 0, \quad \text{pour } g \geq 0 \end{aligned} \tag{3.6}$$

3.3.4 Définition du contact dans le logiciel LS-DYNA

Le logiciel LS-DYNA utilise la méthode de pénalité pour l'algorithme de contact. Le principe consiste à simuler des ressorts entre chaque nœud "contactant" et les surfaces "cibles".

Le logiciel propose trois variantes différentes de l'algorithme de contact par pénalité :

- La formulation standard de pénalité (Standard Penalty Formulation)

C'est l'algorithme de contact le plus général : pour chaque nœud contactant, une vérification est effectuée auprès des surfaces cibles pour savoir s'il y a pénétration ou non. Dès que l'algorithme remarque une pénétration, c'est-à-dire lorsque la distance normale l entre le nœud "contactant" et le segment "cible" est négative, une force d'interface f_s est ajoutée.

$$f_s = -l k_i n_i, \quad \text{pour } l < 0 \tag{3.7}$$

où k_i est le facteur de rigidité, et n_i le vecteur normal du segment "cible".

Pour un élément solide, k_i est défini en fonction du module de compressibilité K_i , du volume V_i , et de l'aire de la face A_i de l'élément qui contient le segment "cible".

$$k_i = \frac{f_{si} K_i A_i^2}{V_i} \quad (3.8)$$

De plus, le facteur f_{si} est un coefficient de pondération de la rigidité de l'interface. Dans le cas de la formulation standard de pénalité, f_{si} est défini comme le produit des facteurs SLSFAC et SFS. Le paramètre SLSFAC est appliqué à tous les contacts utilisant la formulation standard de pénalité, tandis que le paramètre SFS peut prendre une valeur différente pour chaque contact défini.

— Soft Constraint Penalty Formulation

Cette formulation peut se révéler utile dans le cas où les deux entités rentrant en contact ont des propriétés de matériaux différentes, comme par exemple un objet considéré comme "mou" et un autre objet considéré comme "dur".

— Segment-based Penalty Formulation

Cette formulation utilise un algorithme segment-segment plutôt qu'un algorithme nœud-segment, utile notamment pour les simulations impliquant des airbags.

Lors de la définition d'un contact entre deux objets, un coefficient d'amortissement visqueux peut être défini, aussi appelé Viscous Damping Coefficient (VDC), afin d'éviter les oscillations excessives lors du contact. Le coefficient est défini comme un pourcentage de l'amortissement critique.

Contact Surface/Surface

Il existe dans LS-DYNA plusieurs façons de détecter les nœuds "contactants" et les surfaces cibles. Avec l'algorithme de contact SURFACE_TO_SURFACE, les segments contactants détectent les surfaces cibles. Dans les modèles présentés par la suite, l'algorithme de contact NODES_TO_SURFACE sera utilisé, puisqu'il s'agit d'un algorithme qui détecte les pénétrations entre les nœuds "contactants" et les surfaces cibles, de façon similaire à l'algorithme de contact utilisé dans ADINA.

3.4 Analyse numérique d'un modèle simplifié de l'impact d'un camion sur un tablier de pont

Maintenant que la modélisation du contact sur les deux logiciels d'éléments finis a été présentée, il convient de revenir au modèle d'impact d'excavatrice sur un tablier de pont, en introduisant tout d'abord un modèle simplifié.

3.4.1 Présentation des résultats de Berton et al. sur ADINA

Le modèle présenté par Berton et al. consiste à simuler une collision entre un camion-plateau transportant une excavatrice et un tablier de pont. La géométrie du système camion-plateau/excavatrice a été simplifiée pour ne tenir compte que de la surface de contact de l'excavatrice contre le tablier de pont ainsi que d'une surface horizontale représentant le plateau du camion. La masse totale du système a été ramenée à une masse ponctuelle localisée approximativement au centre de gravité du système. La masse et les surfaces sont reliées par des liens rigides permettant d'assurer la rigidité globale du système. D'autre part, le tablier de pont a été ramené à une dalle rectangulaire, dont le maillage de la face avant (où se produit la collision) a été raffiné pour optimiser les temps de calcul.

Berton conclut son étude sur le fait qu'il est nécessaire de réévaluer les normes actuelles liées aux collisions de véhicules sur les infrastructures routières. En effet, l'auteur a obtenu de ses résultats des valeurs jusqu'à 4 fois supérieures aux normes issues de l'Eurocode. Pour finir, Berton expose différentes pistes de recherche possibles, dont l'ajout de friction entre la route et le camion, la prise en compte des mécanismes d'endommagement des matériaux (phénomènes non linéaires des matériaux) et l'utilisation de différents tabliers de pont.

3.4.2 Modélisation numérique sur ADINA

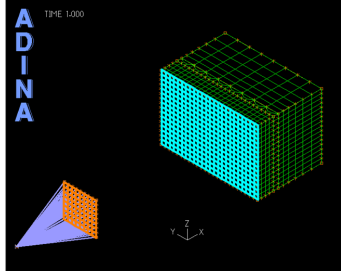
Le modèle présenté ici a été réalisé à partir du modèle ADINA développé par Berton et al. 2.12, dont certains paramètres ont été modifiés afin de ne s'intéresser qu'au contact entre la pelle de l'excavatrice et une version tronquée du tablier de pont, réduisant ainsi le temps de calcul nécessaire pour les simulations. La figure 3.3 montre un aperçu des différents modèles simplifiés ainsi introduits.

Pour étudier les différents effets du contact, la partie représentant la surface de l'excavatrice entrant en contact avec le tablier (aussi appelée plaque d'impact), originellement définie comme une plaque rigide, a également été modélisée comme un solide dans une variante du modèle.

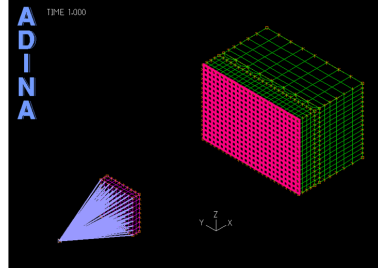
La plaque d'impact fait 1 m de largeur et de hauteur, dont le maillage consiste en 8 éléments carrés de longueur 0.125 m. L'aire de 1 m² de la plaque a été choisie afin de simplifier les calculs. Pour le modèle avec la plaque rigide, des éléments à 4 nœuds sont utilisés, tous reliés à une masse nodale $m_{ref} = 10\,000$ kg. La masse nodale est approximativement positionnée au niveau du centre de gravité du camion transportant l'excavatrice, afin de refléter la masse totale du véhicule impactant. La valeur de 10 000 kg a été retenue afin de simplifier les calculs. Pour le modèle avec le solide, la plaque d'impact est représentée comme un parallélépipède d'épaisseur $t_{ref} = 0.2$ m, dont les cotés mesurent 1 m chacun. Le solide est composé d'éléments à 8 nœuds, et son côté faisant face à la masse nodale est relié par des liens rigides à la masse. Un matériau élastique de densité $\rho_{ref} = 0.01$ kg/m³ et de module de Young $E_{IP} = 2 \times 10^{12}$ Pa est utilisé pour le solide. Ces choix ont été faits afin d'essayer de se rapprocher d'une configuration avec une plaque infiniment rigide.

Le tablier de pont tronqué a une hauteur de 2 m, une longueur de 2 m et une largeur de 3 m. La taille des éléments du maillage du tablier est progressive en fonction de sa sensibilité à l'impact. Sur la face avant, donc celle où l'impact avec le véhicule se produit, des éléments de taille 0.125 m sont utilisés. Les appuis du pont sont modélisés par l'application d'une contrainte en translation et en rotation sur 4 éléments de la face inférieure du tablier. Ces encastrements des appuis ont été choisis afin de réduire la complexité du comportement du pont aux appuis afin de s'intéresser au phénomène d'impact entre l'excavatrice et le tablier de pont. Le pont est composé d'un matériau élastique d'une densité de 2 400 kg/m³ et de module de Young $E_{pont} = 2 \times 10^{13}$ Pa.

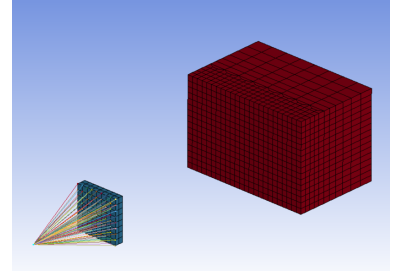
Pour le modèle de référence, le facteur de compliance est nul ($C_{ref} = 0$), ce qui ne permet aucune pénétration des nœuds lors de l'impact. Le véhicule, initialement positionné à 4 m de la face avant du pont, possède une vitesse initiale de $v_{ref} = 20$ m/s, soit 72 km/h. La gravité est considérée dans le modèle de référence.



(a) Modèle avec la plaque rigide sur ADINA



(b) Modèle avec la plaque solide sur ADINA



(c) Modèle avec la plaque solide sur LS-DYNA

FIGURE 3.3 Modèles utilisés sur ADINA et LS-DYNA

3.4.3 Modélisation numérique sur LS-DYNA

Une fois le modèle ADINA créé, son maillage a été importé dans le logiciel LS-DYNA à l'aide d'un fichier Nasa STRuctural ANalysis (NASTRAN). Les différentes propriétés présentées précédemment ont été définies dans le modèle LS-DYNA. Étant donné qu'il n'a pas été possible de recréer une plaque rigide dans LS-DYNA, seule la variante avec le solide a été modélisée.

3.4.4 Comparaison du contact entre les logiciels ADINA et LS-DYNA

Les deux logiciels ne permettant pas de définir exactement les mêmes caractéristiques de contact pour les deux modèles, une calibration approximative du contact est nécessaire afin de s'assurer d'une comparaison valide. Pour ce faire, la force d'interface de LS-DYNA (considérée comme une force équivalente à celle d'un ressort de rigidité k_i) est mise en relation avec la force de contact d'ADINA, définie comme une pression appliquée sur une aire.

D'après les équations (3.7) et (3.6), et en supposant la même variable pour la longueur normale ou "gap" entre le nœud contactant et la surface cible, soit $g = l$, et en prenant A comme l'aire de la surface cible, V le volume de l'élément où se trouve la surface cible, on peut définir la relation suivante :

$$\|f_s\| = -lk_i = -\frac{l f_{si} K_i A^2}{V} \quad (3.9)$$

On peut également établir la relation suivante, étant donné que la force d'interface sur ADINA est définie comme une pression sur une aire donnée :

$$\|f_s\| = p_g A \quad (3.10)$$

Soit, en utilisant l'équation (3.6)

$$-\frac{l f_{si} K_i A^2}{V} = -\frac{l A}{\hat{c}} \quad (3.11)$$

où

$$\frac{f_{si} K_i A}{V} = \frac{1}{\hat{c}} \quad (3.12)$$

et enfin

$$\frac{V}{f_{si} K_i A} = \hat{c} \quad (3.13)$$

Par exemple, pour un élément fini solide du pont situé sur la face impactée : le module de compressibilité est de $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$, le facteur de rigidité $f_{si} = 0.1$, soit la valeur par défaut, et l'aire est calculée comme l'aire d'un carré de coté 0.125 m.

Étant donné que les propriétés élastiques des deux solides entrant en contact ne sont pas les mêmes, il est possible d'introduire un module de compressibilité équivalent K_{eq} en supposant que les deux solides agissent comme deux systèmes masse-ressort installés en série. K_{eq} est finalement calculé en fonction des deux modules de compressibilité K_1 et K_2 avec la formule suivante :

$$K_{eq} = \frac{K_1 \times K_2}{K_1 + K_2} \quad (3.14)$$

Cette formule est issue de l'étude menée par Mowlavi et al. (2021), dont le but était d'établir une loi de contact entre deux corps élastiques anisotropiques [36].

Dans sa forme originale, l'équation est définie avec les modules de Young des deux corps en contact :

$$E_{eq} = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^{-1} \quad (3.15)$$

qui représente une formulation du module de Young équivalent selon Mowlavi et al. (2021) [36].

Après calculs, une valeur de compliance de $\hat{c} = 1.85625 \times 10^{-12}$ est finalement obtenue. Un modèle de calibration sur le logiciel ADINA est ensuite créé, en définissant le contact avec la valeur de compliance trouvée précédemment.

Les résultats sont présentés à la figure 3.4, et les deux modèles semblent avoir un comportement similaire, avec un écart de 5.27% entre les résultats de force de contact maximale des deux logiciels. L'écart relatif entre les deux résultats peut être causé par la prise en compte des non-linéarités des matériaux dans le logiciel LS-DYNA. De plus, il est important de noter que la calibration du contact effectuée se rapproche plus d'une équivalence approximative plutôt qu'une transposition exacte entre les algorithmes de contact de LS-DYNA et d'ADINA.

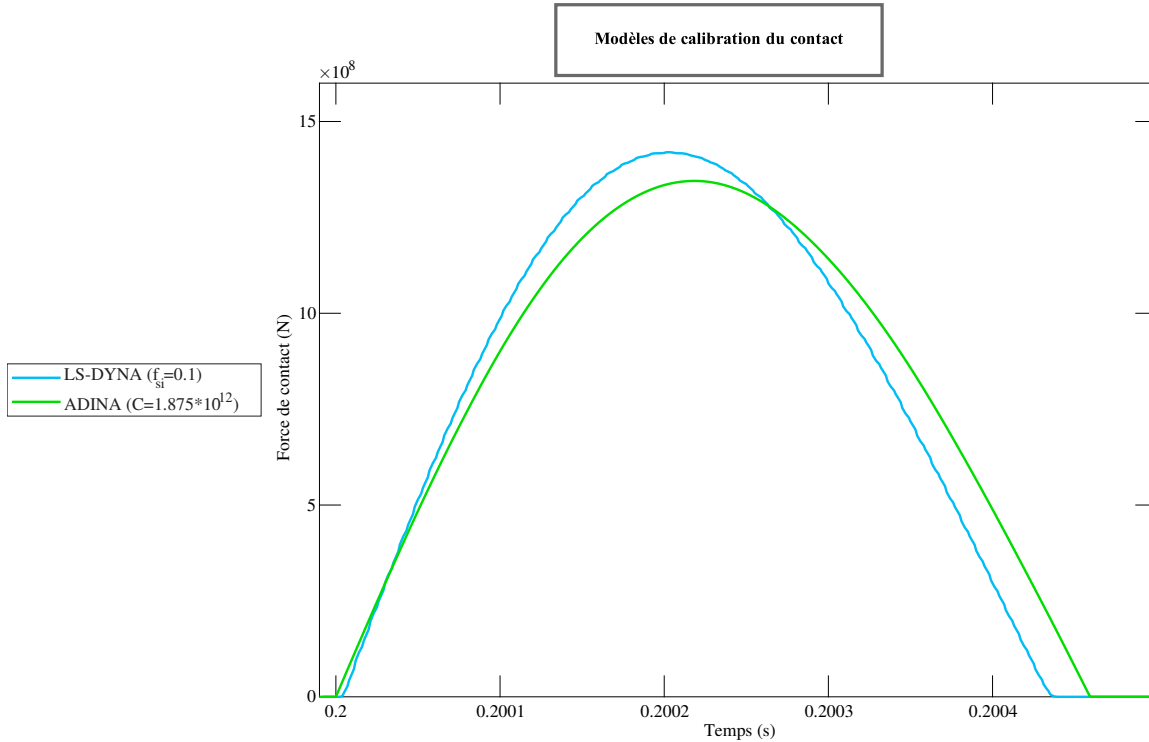


FIGURE 3.4 Calibration du contact entre les modèles ADINA et LS-DYNA

Pour compléter cette étude, une analyse énergétique du contact sera réalisée pour approfondir les résultats obtenus.

3.4.5 Comparaison énergétique des modèles ADINA et LS-DYNA

Dans cette partie, les différentes énergies entrant en jeu lors du contact sont présentées. L'énergie cinétique du modèle est représentée à la figure 3.5, l'énergie interne est représentée à la figure 3.6 et l'énergie de contact est représentée à la figure 3.7.

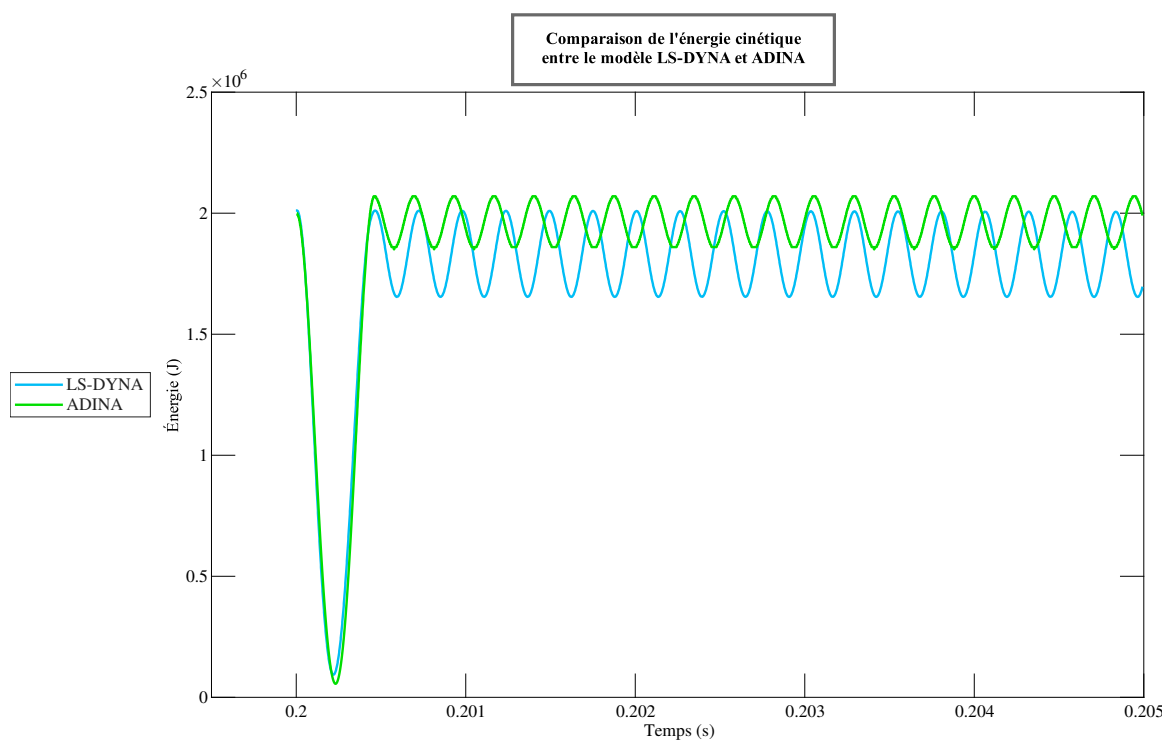


FIGURE 3.5 Comparaison de l'énergie cinétique entre le modèle ADINA et le modèle LS-DYNA

On remarque d'après la figure 3.5 que les énergies de contact dans le modèle ADINA et dans le modèle LS-DYNA suivent la même tendance au moment de l'impact, puis les oscillations d'énergie cinétique sont légèrement plus importantes dans le modèle LS-DYNA.

Dans le logiciel LS-DYNA, l'énergie interne comprend l'énergie de déformation élastique ainsi que le travail produit lors des déformations plastiques irréversibles.

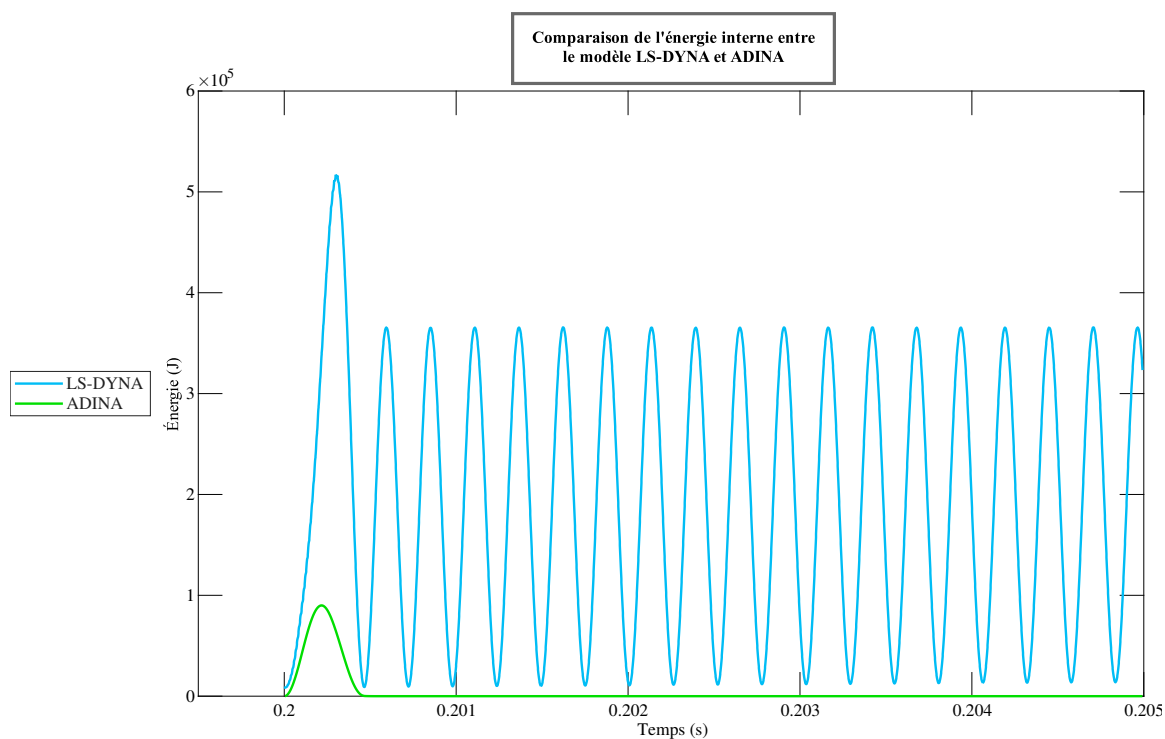


FIGURE 3.6 Comparaison de l'énergie interne entre le modèle ADINA et le modèle LS-DYNA

D'après la figure 3.6, on remarque une nette différence entre l'énergie interne obtenue sur LS-DYNA avec celle obtenue sur ADINA. Ce résultat devrait être investigué davantage. On peut néanmoins émettre l'hypothèse que les résultats diffèrent en raison de la stabilité inconditionnelle de l'analyse implicite sur le logiciel ADINA, contrairement à l'analyse explicite effectuée sur LS-DYNA, d'où proviennent probablement les oscillations observées à la figure 3.6.

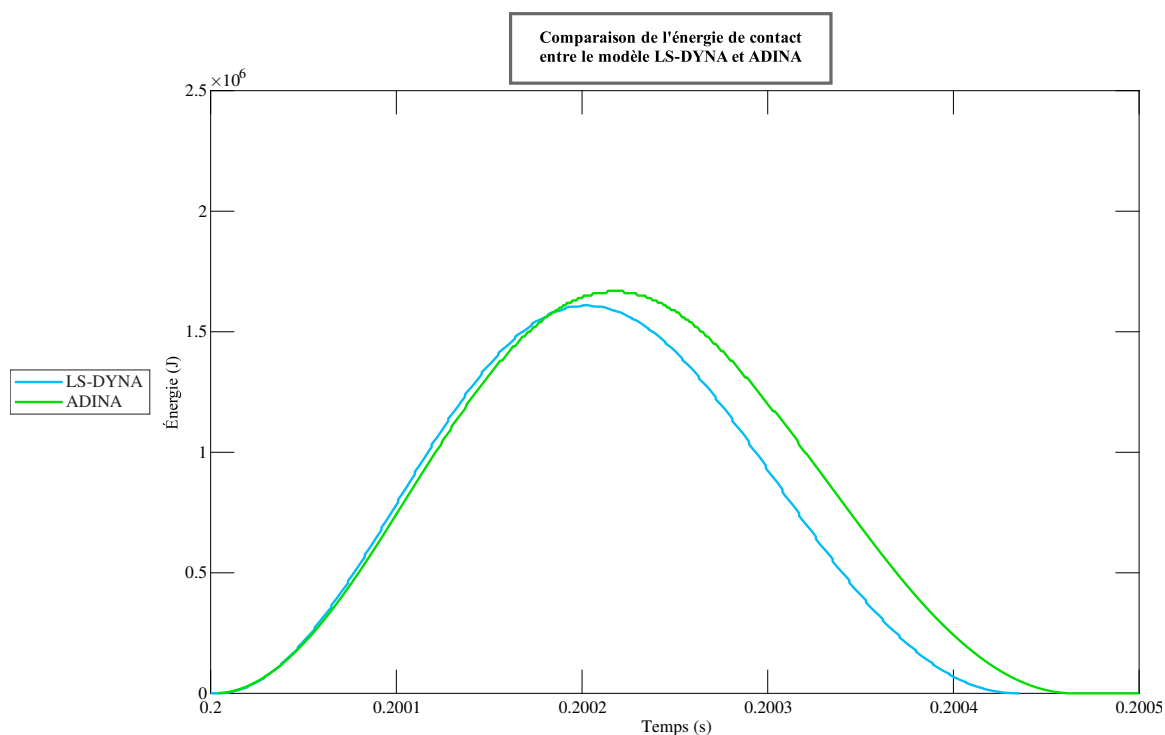


FIGURE 3.7 Comparaison de l'énergie de contact entre le modèle ADINA et le modèle LS-DYNA

On remarque d'après la figure 3.7 que la forme globale de la courbe de l'énergie de contact est similaire dans les deux modèles.

Les différences observées dans les différents résultats d'énergie entre les logiciels LS-DYNA et ADINA peuvent provenir du fait que la calibration effectuée se rapproche plus d'une équivalence du contact plutôt qu'une transposition exacte du contact, dont les algorithmes de contact des deux logiciels diffèrent.

3.4.6 Analyse paramétrique

Dans cette partie, les effets de plusieurs paramètres vont être analysés, tels que le maillage et la rigidité de la plaque d'impact, les propriétés des matériaux utilisés, les paramètres de contact et la vitesse initiale.

Effets du maillage

Afin d'étudier l'effet du maillage pour le cas de la plaque solide, un maillage "raffiné" est créé en divisant en deux les éléments de la plaque d'impact. Le maillage de référence et le maillage "raffiné" sont représentés à la figure 3.8. Ensuite, plusieurs modèles sont créés avec ces deux maillages en faisant varier la rigidité de la plaque d'impact afin d'évaluer l'effet de la rigidité sur la force de contact.

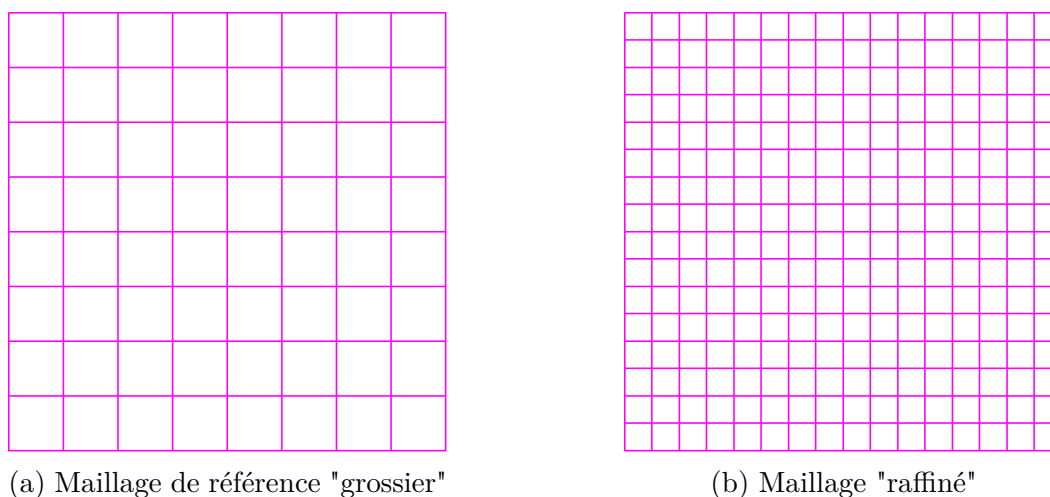


FIGURE 3.8 Maillages de la plaque d'impact utilisés dans les modèles ADINA et LS-DYNA

Les résultats de la force de contact des modèles avec une plaque solide de rigidité 1 000 Pa et de rigidité 2 MPa sont respectivement représentés aux figures 3.9 et 3.10.

On remarque qu'une rigidité de 1 000 Pa produit de grandes instabilités lors du contact, comme le montre la figure 3.9.

On remarque également qu'avec une rigidité de plaque d'impact de 2 MPa, les valeurs de force de contact dans le cas du maillage grossier sont nulles après 0.2005 s, ce qui peut s'expliquer par le fait que la plaque subit trop d'instabilités et que le modèle ne converge pas du fait de la faible rigidité et la taille du maille.

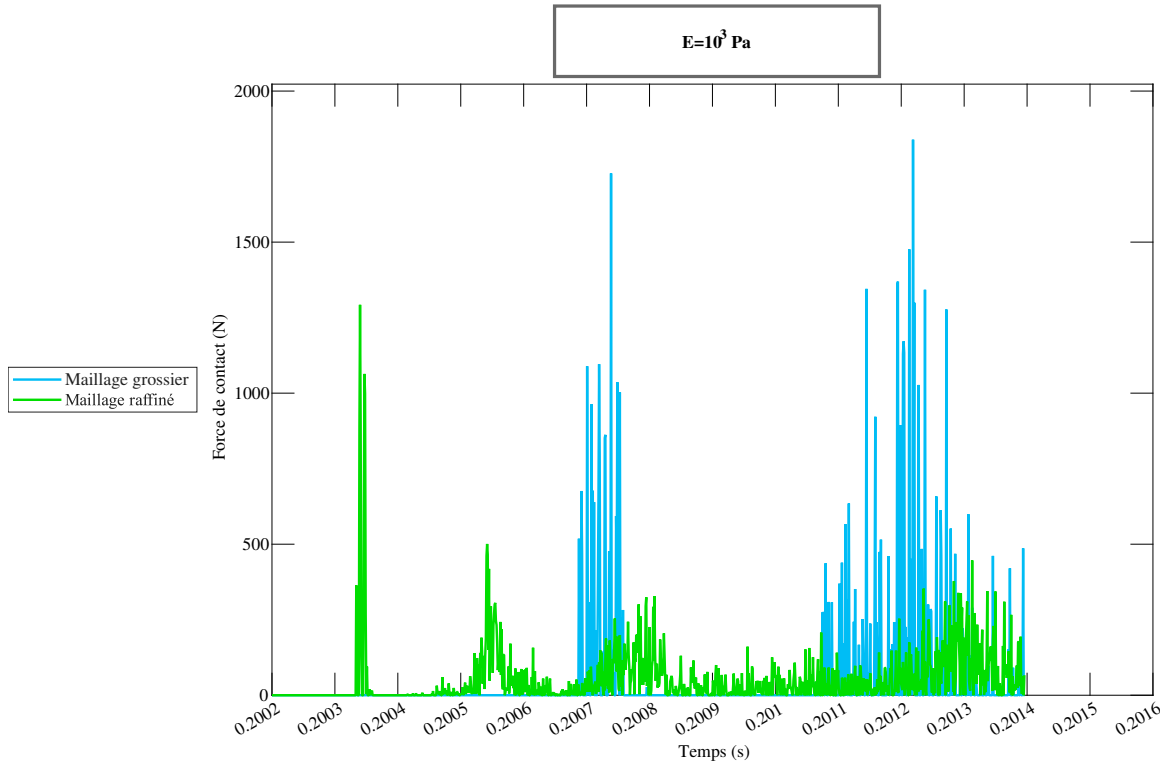


FIGURE 3.9 Force de contact obtenue avec $E = 10^3 Pa$

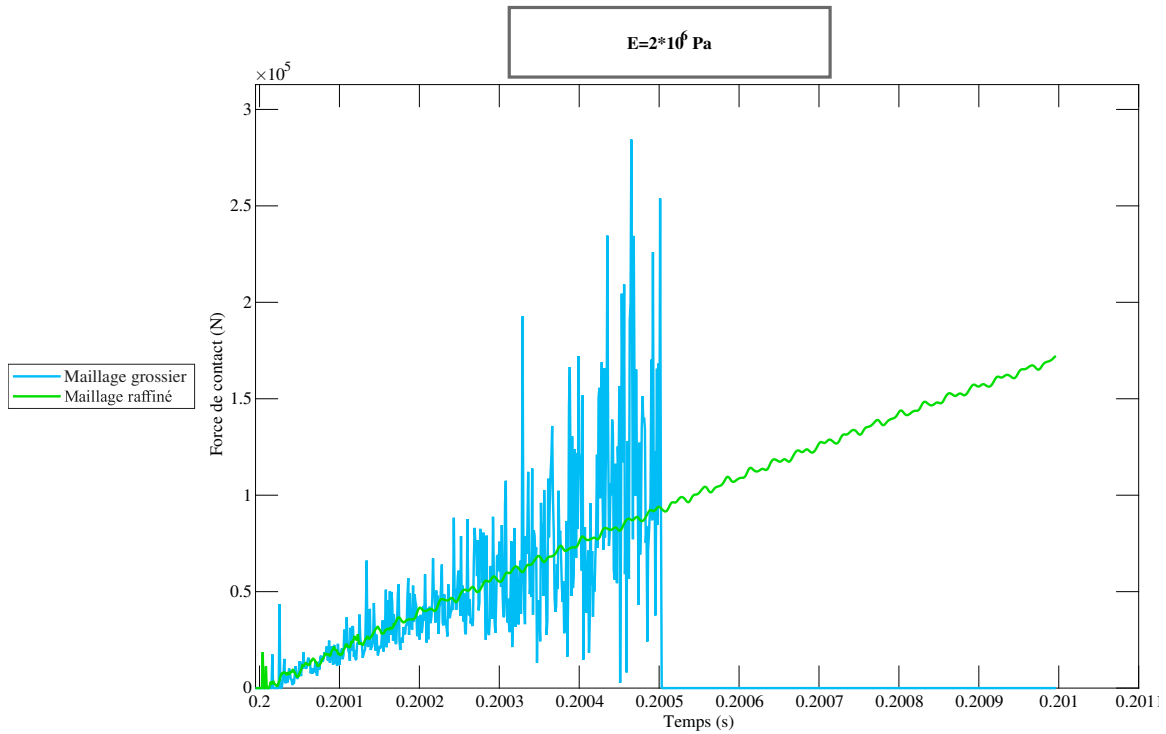


FIGURE 3.10 Force de contact obtenue avec $E = 2 \times 10^6 Pa$

Il semble que le modèle atteigne une certaine convergence pour une rigidité de 2×10^8 Pa, pour le maillage grossier et raffiné. De plus, pour des valeurs de rigidité supérieures ou égales à 2×10^8 Pa, il semble que la taille et le nombre d'éléments n'ont plus d'effets sur la force de contact.

Enfin, les deux modèles avec le maillage "grossier" et "raffiné" sont testés avec une rigidité de plaque d'impact de 200 GPa, afin de se rapprocher d'une valeur réaliste de la rigidité d'un bras d'excavatrice.

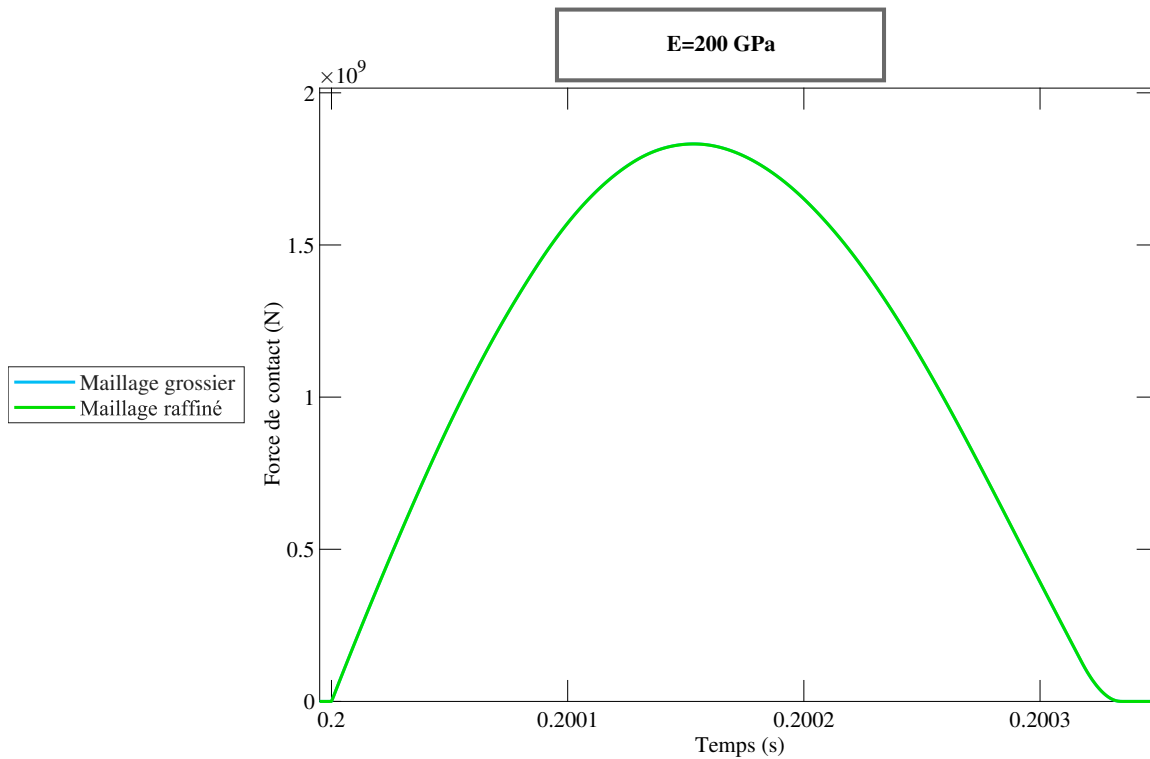


FIGURE 3.11 Force de contact obtenue avec $E = 200 \text{ GPa}$

Finalement, il convient de remarquer que plus la rigidité de la plaque d'impact est grande, plus la durée du contact est faible et plus le pic de force de contact est grand.

De plus grandes rigidités sont ensuite testées pour voir les effets sur la force de contact.

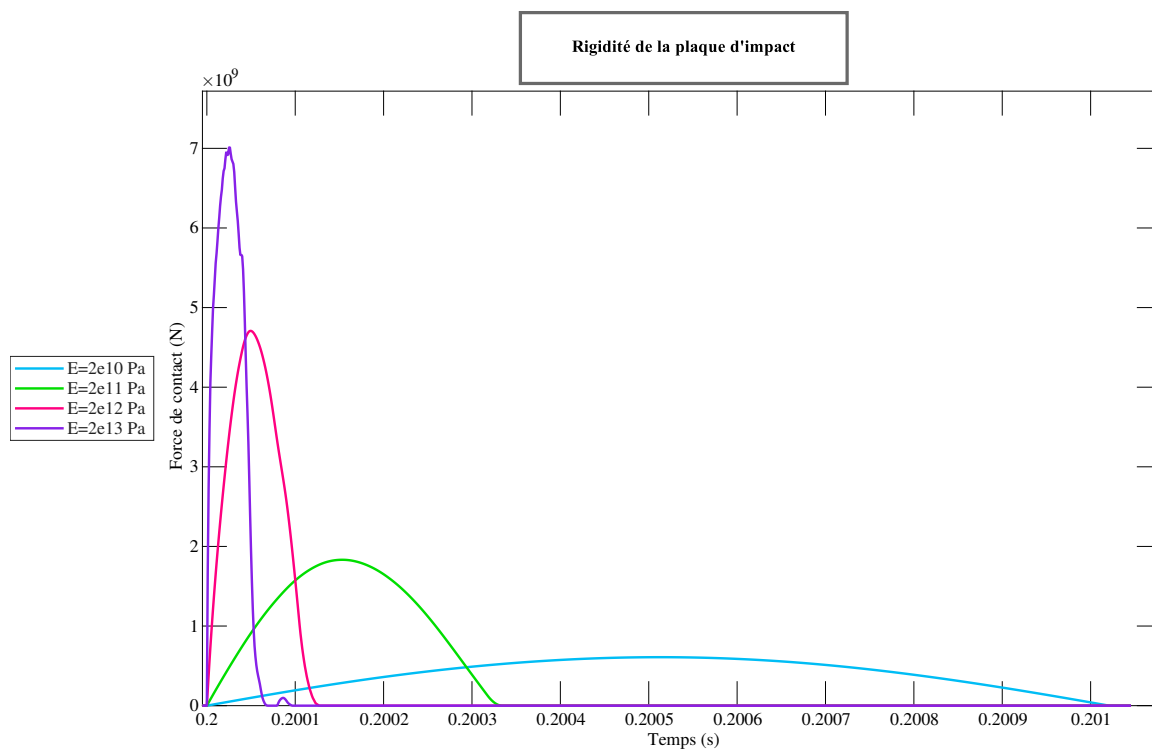


FIGURE 3.12 Force de contact obtenue en fonction de la rigidité de la plaque

D'autre part, dans le cas où le module de Young du solide est de $2 \times 10^{11} Pa$, le résultat est similaire à la force de contact obtenue avec le modèle utilisant la plaque rigide, montré à la figure 3.13. Cela peut s'expliquer par le fait que la valeur par défaut du paramètre de rigidité du contact k_n est de 10^{11} par défaut.

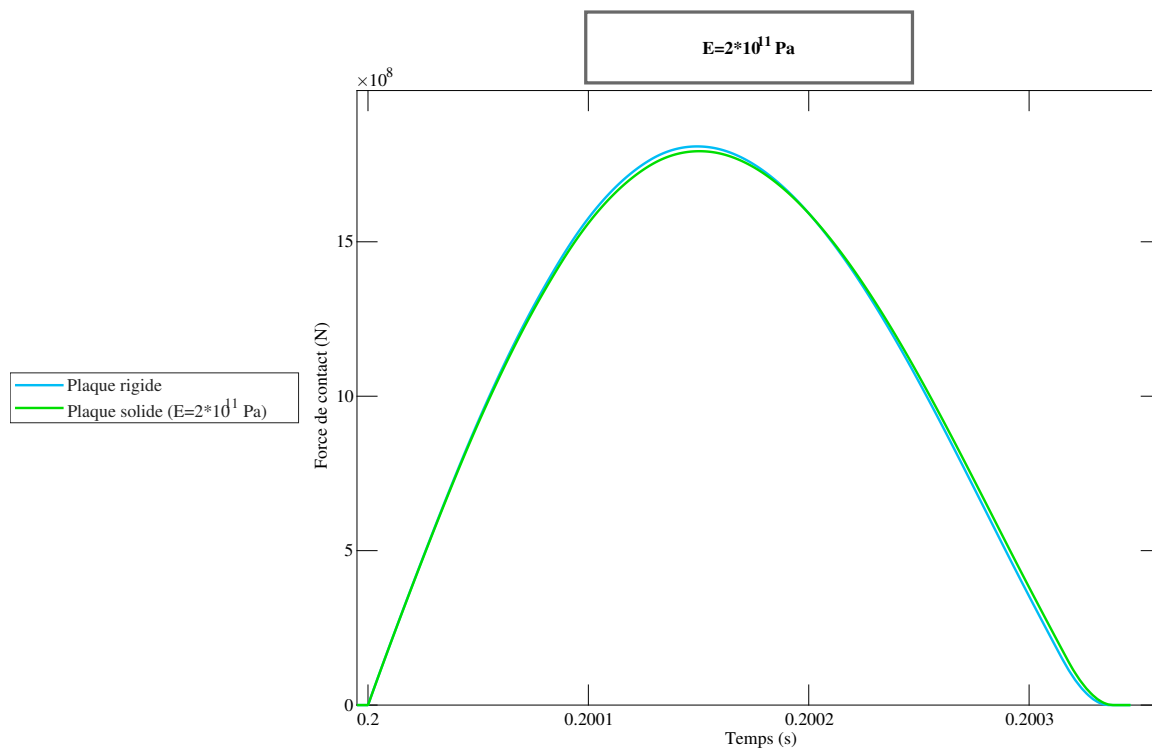


FIGURE 3.13 Comparaison de la force obtenue entre la plaque rigide et le solide de rigidité $E = 2 \times 10^{11} Pa$

Effets des paramètres de contact

On remarque que plus le facteur de compliance est grand, autrement dit plus le contact est considéré comme "souple", plus la durée du contact est longue et plus l'amplitude maximale de force est petite, comme le montre la figure 3.14. D'autre part, on remarque que l'allure de la courbe de contact entre le modèle avec la plaque rigide et le modèle avec le solide et un facteur de compliance de $1e-12$ est plutôt similaire. La différence observée peut provenir du fait que la plaque rigide n'a aucune masse, tandis que les éléments solides composant la plaque solide possèdent une masse.

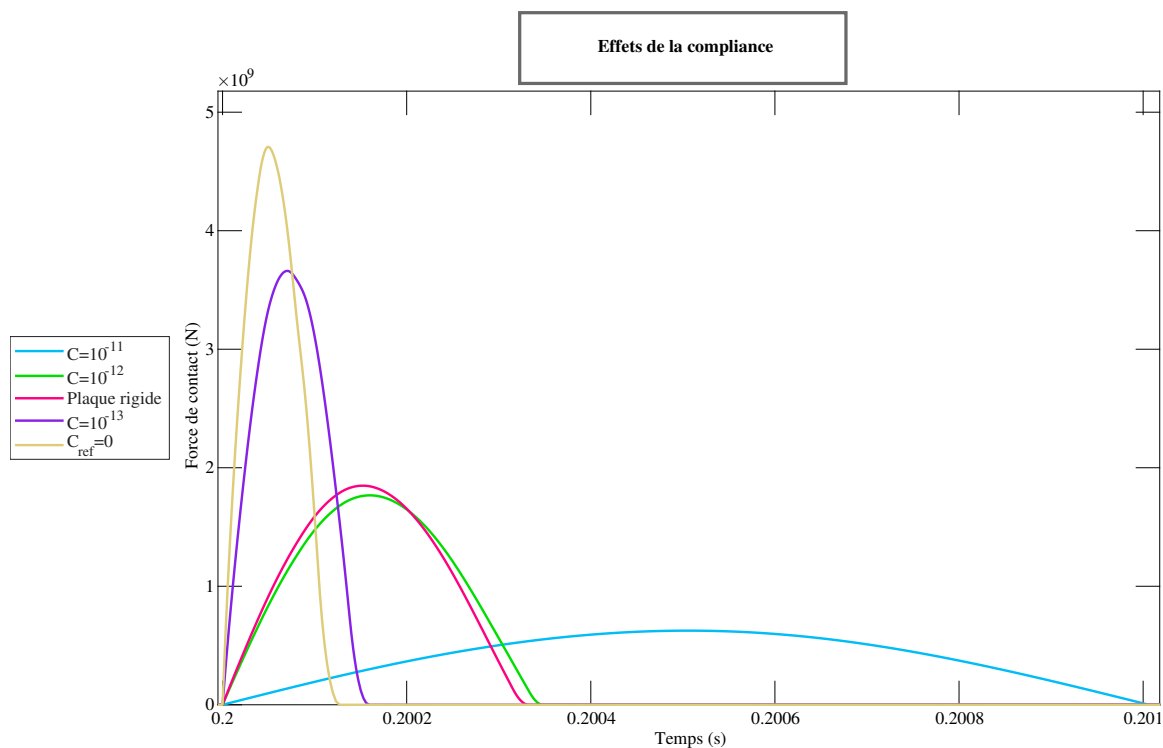


FIGURE 3.14 Résultats entre les différents facteurs de compliance (C)

Effets de l'algorithme de contact

Dans cette analyse effectuée sur LS-DYNA, deux algorithmes de contacts sont testés pour s'assurer que les modèles ADINA et LS-DYNA ont un algorithme de contact similaire. Les résultats sont montrés à la figure 3.15.

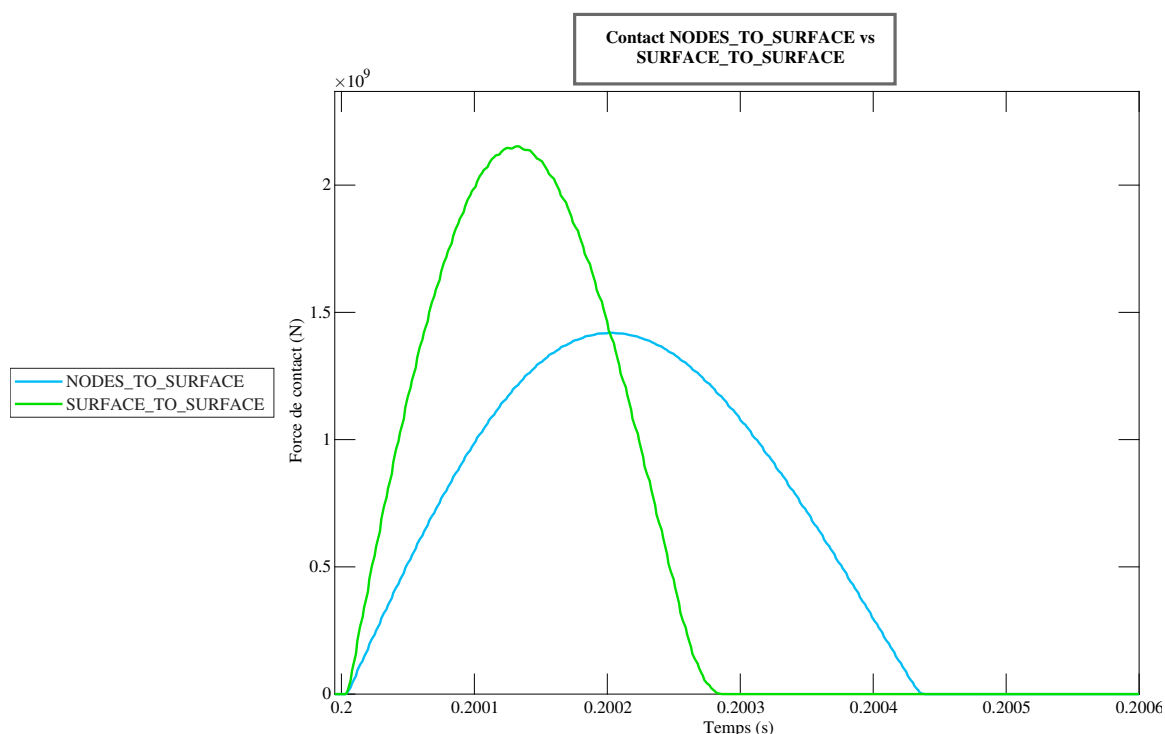


FIGURE 3.15 Comparaison de la force de contact en fonction de l'algorithme de contact utilisé

Les résultats montrent qu'en utilisant l'algorithme SURFACE_TO_SURFACE, l'impact est de plus courte durée mais plus forte en intensité. Cela pourrait provenir de la symétrie de l'algorithme de contact utilisé pour la méthode SURFACE_TO_SURFACE, ou bien de sa meilleure précision comparée à l'algorithme NODES_TO_SURFACE. Cela montre effectivement que le choix de l'algorithme de contact est crucial lors de la modélisation numérique du contact.

Effets des conditions initiales

Ensuite, les effets de la vitesse initiale du véhicule sur la force de contact sont étudiés, dont les résultats sont résumés à la figure 3.16. La force de contact augmente en fonction de la vitesse du véhicule, cependant il ne semble pas que la vitesse ait un effet sur la durée du contact.

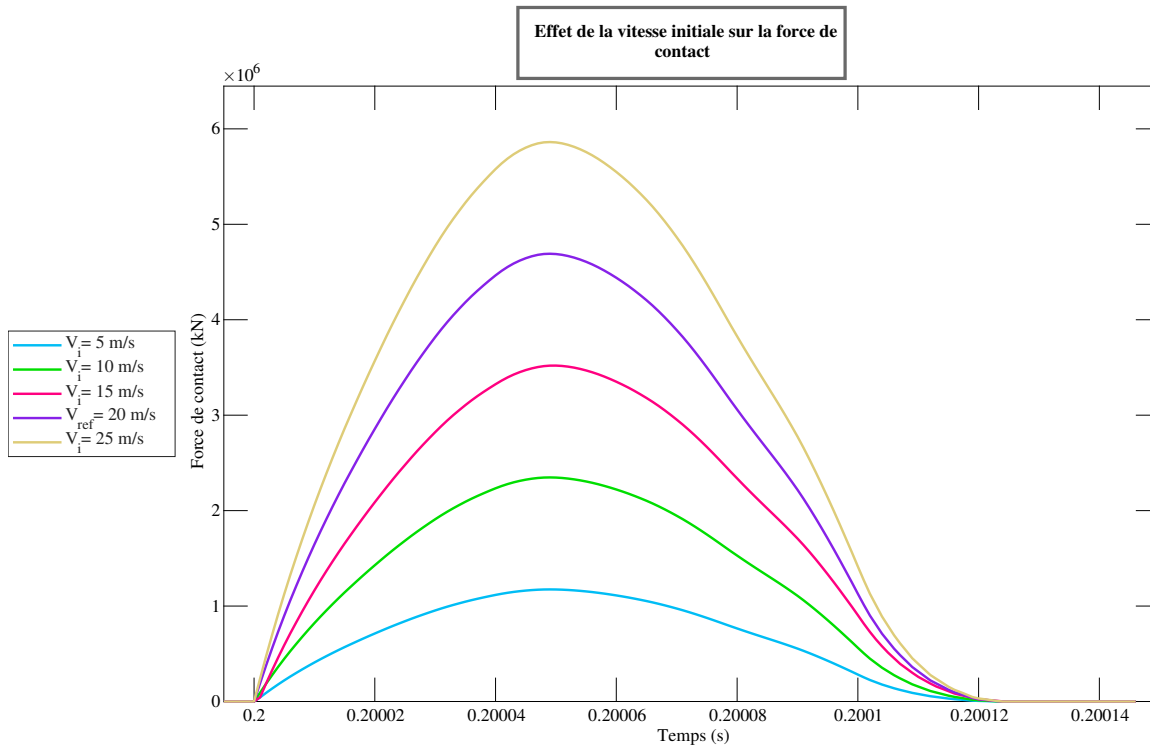


FIGURE 3.16 Évolution de la force de contact en fonction de la vitesse initiale de la plaque d'impact

Effets de la masse

Une analyse paramétrique sur la masse nodale est ensuite effectuée. Pour des masses allant de 1 000 kg à 20 000 kg, les forces de contact respectives sont calculées et présentées dans la figure 3.17. On remarque que l'augmentation de la masse influe directement sur la durée du contact et l'amplitude maximale de la force de contact.

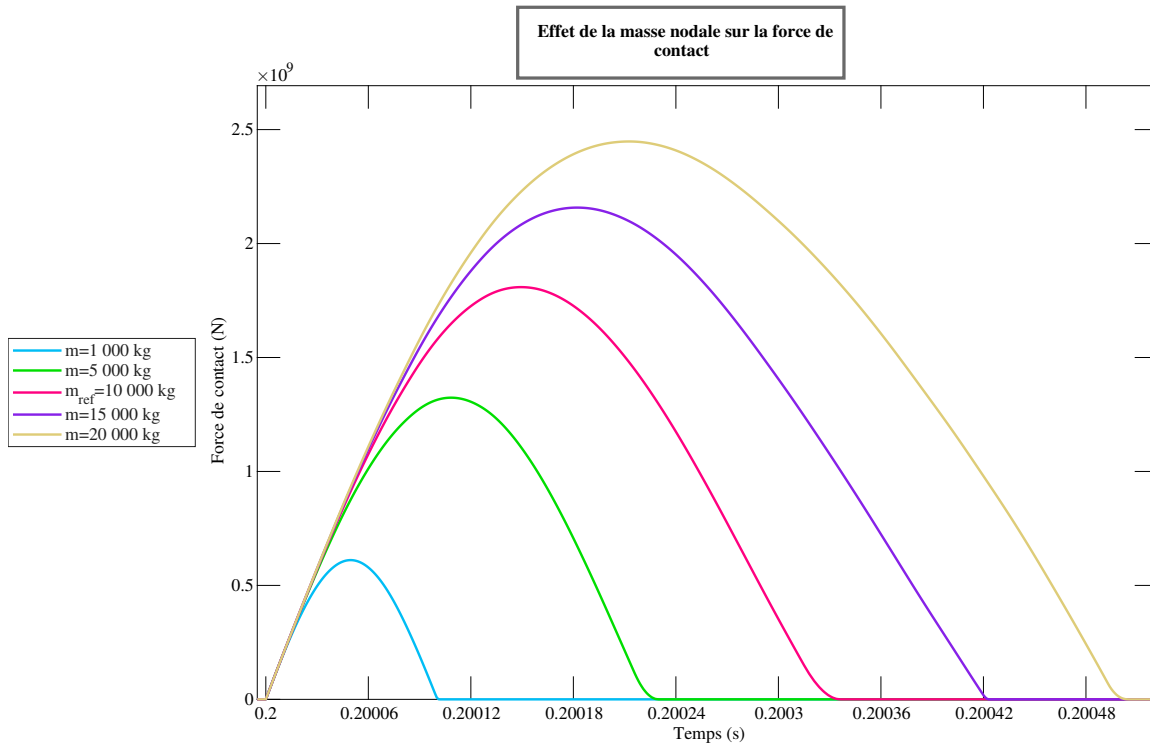


FIGURE 3.17 Effet de la masse nodale sur la force de contact

D'un autre côté, l'influence de la masse du pont sur la force de contact est également effectuée 3.18. Cette fois, on observe une différence moindre entre les différentes forces de contact. Cela peut s'expliquer par le fait que le pont a été encastré à différents endroits.

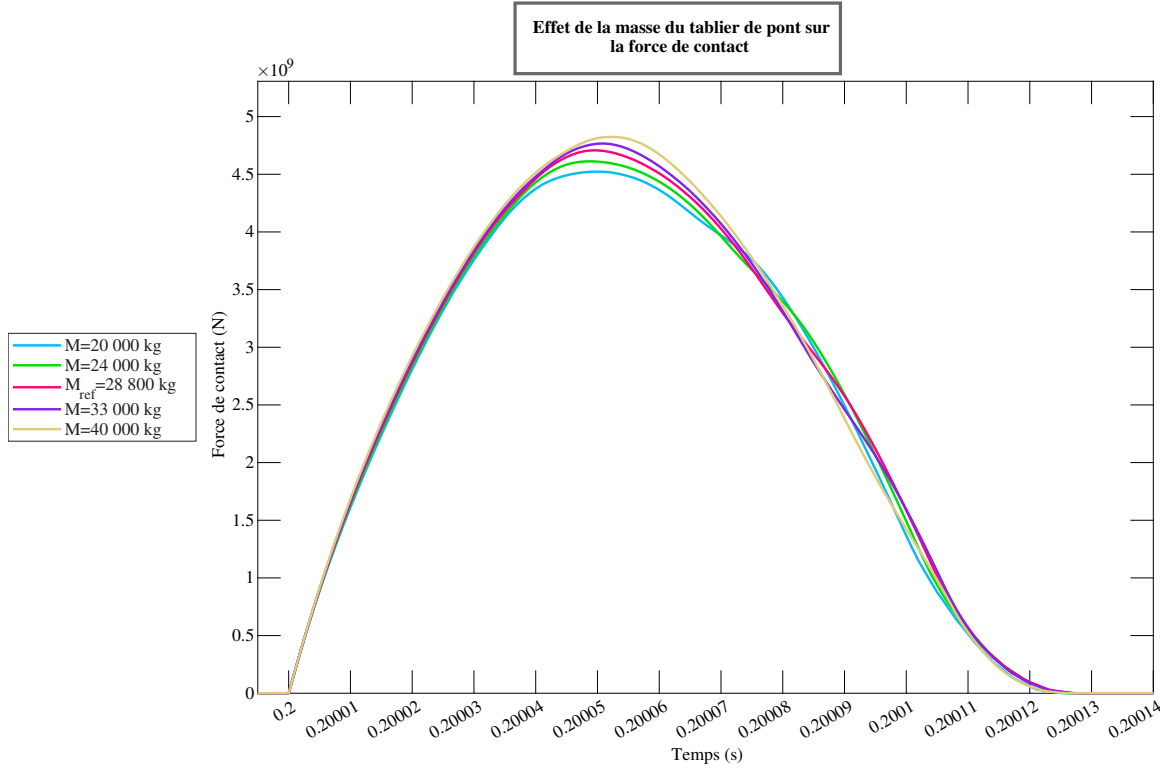


FIGURE 3.18 Effet de la masse du tablier de pont sur la force de contact

Effets de l'augmentation artificielle de la masse

Afin de réduire les temps de calcul en analyse explicite, les logiciels d'éléments finis comme LS-DYNA peuvent artificiellement augmenter certaines masses lors d'une procédure appelée "mass-scaling". En effet, le logiciel utilise par défaut un pas de temps calculé avec la taille du plus petit élément du modèle ainsi que la vitesse de propagation d'une onde dans le matériau (3.16). La diversité du maillage peut donc engendrer un long temps de calcul, pouvant être réduit en faisant appel au "mass-scaling". Lors du calcul, il est possible d'augmenter artificiellement la masse de certains éléments, permettant ainsi d'augmenter la valeur critique du pas de temps. Le pas de temps critique peut alors être estimé à partir de la relation suivante :

$$\Delta t_{\min} = \frac{l_{\min}}{c} \quad (3.16)$$

avec

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}} \quad (3.17)$$

Afin de s'assurer de la validité des modèles LS-DYNA, il convient d'étudier les résultats obtenus sans la procédure de "mass-scaling". Les résultats avec et sans augmentation artificielle de la masse pour un même modèle sur LS-DYNA sont représentés à la figure 3.19.

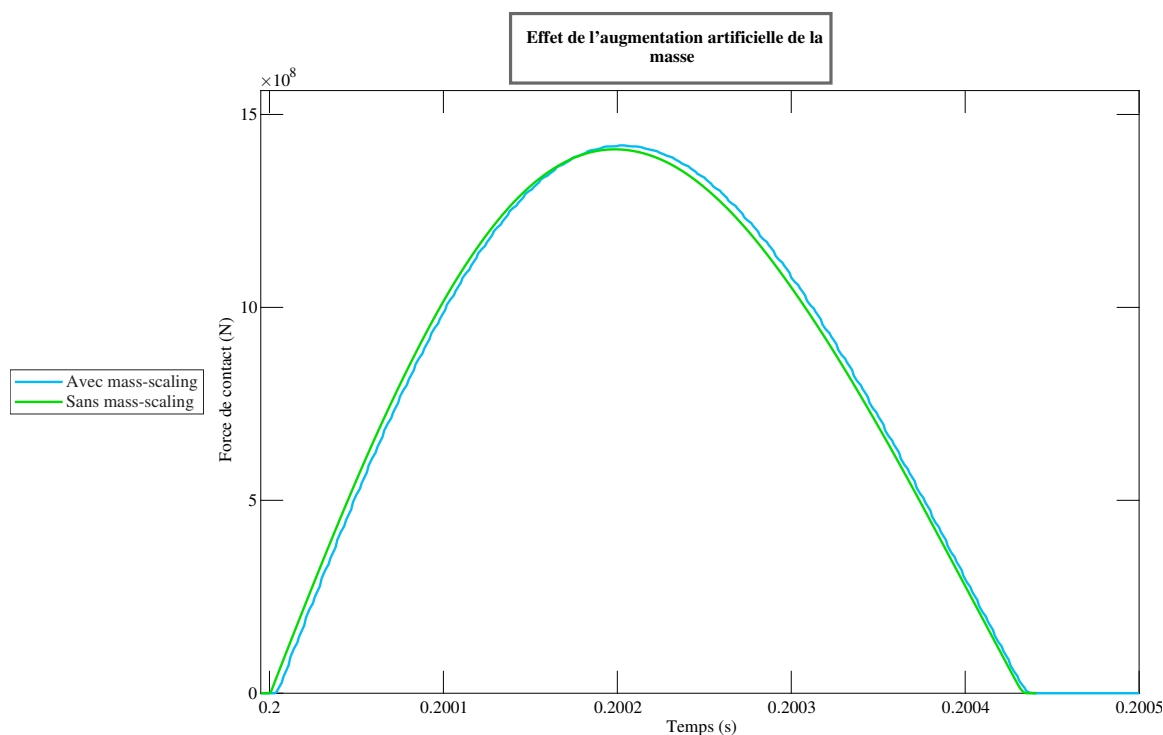


FIGURE 3.19 Effet de la masse nodale sur la force de contact

On remarque que l'augmentation de la masse artificielle n'a pas une grande influence sur les résultats. Cela peut s'expliquer par le fait que ce modèle est suffisamment stable et n'a donc pas besoin de beaucoup de masses ajoutées afin de garantir sa stabilité.

3.4.7 Modélisation de la route et du plateau du camion

Dans un second temps, le plateau du camion géométriquement simplifié est ajouté au modèle numérique précédemment introduit sur le logiciel ADINA, afin d'étudier les effets de la friction entre la route et le camion. Pour ce faire, une surface rigide est positionnée au-dessus de la route et est connectée par des liens rigides à la masse nodale. Le sol introduit est modélisé par des éléments solides. Une vue latérale du modèle ainsi créé est montré en figure 3.20.

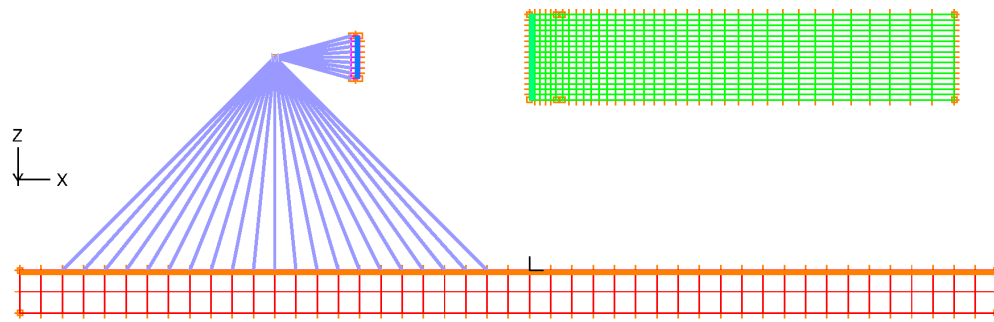


FIGURE 3.20 Modélisation numérique avec le camion simplifié

Effets de la friction

Finalement, plusieurs valeurs de friction entre la route et le plateau du camion sont testées, dont les résultats sont représentés à la figure 3.21.

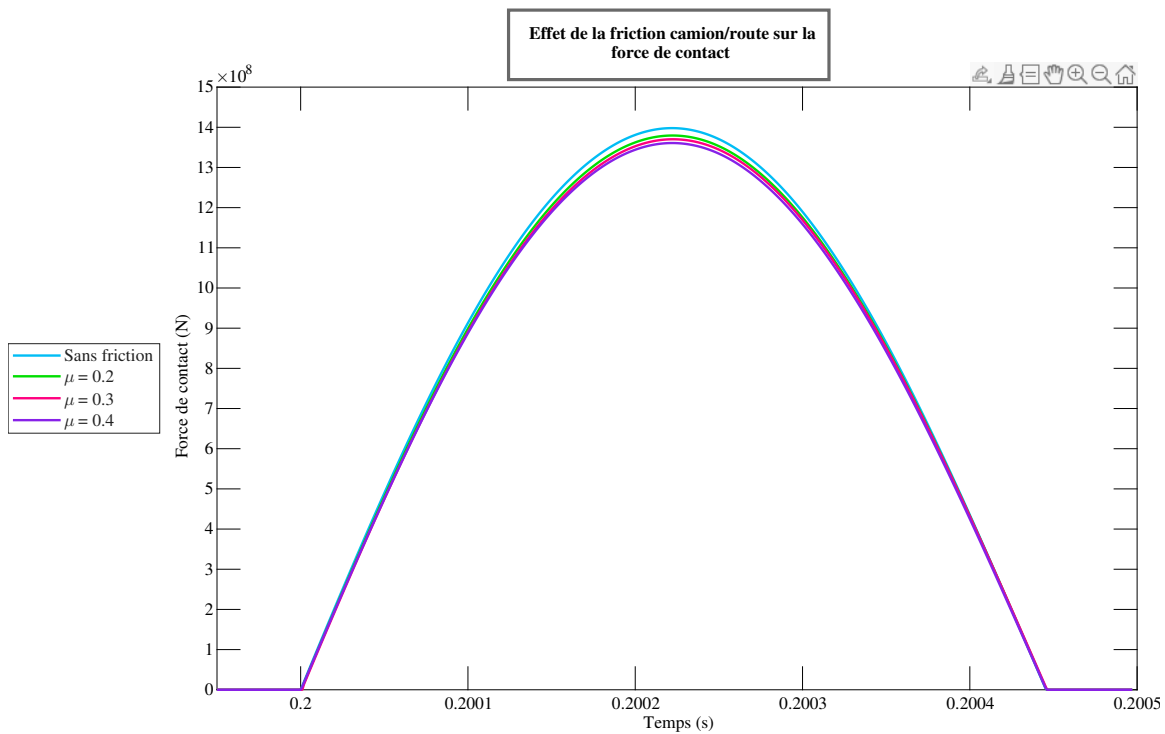


FIGURE 3.21 Résultat de la force de contact en fonction de la friction camion/route

Il semble que la friction entre le camion et le sol n'ait pas d'impact conséquent sur la force de contact.

3.4.8 Comparaison préliminaire avec l'Eurocode

Dans cette partie, une comparaison préliminaire entre les résultats obtenus avec le modèle LS-DYNA et la force prescrite par l'Eurocode selon l'équation (2.3) sera effectuée. Un modèle représentant le cas du contact "dur" est réalisé sur le logiciel LS-DYNA. Le tablier de pont est rendu rigide et les valeurs de référence sont utilisées pour les propriétés de la plaque d'impact.

Afin de pouvoir calculer la formule de l'Eurocode, il convient de calculer la masse du véhicule et sa rigidité. D'après les dimensions du solide, sa rigidité est définie par :

$$k = \frac{EA}{L} \quad (3.18)$$

Avec A l'aire de la plaque d'impact et L son épaisseur. La masse du véhicule est calculée en fonction de la masse nodale ainsi que de la densité du matériau composant la plaque d'impact : $m_{tot} = m_{nodale} + \rho V$, soit $m_{tot} = 10\,000 + 0.01 \times 0.2 = 10\,000.002$ kg.

Enfin, en connaissant la vitesse du véhicule $v_{ref} = 20$ m/s, l'équation de l'Eurocode donne une force équivalente de 6.32×10^9 N.

Le modèle numérique LS-DYNA avec les propriétés énoncées ci-dessus donne finalement une force de contact maximale de 1.54×10^9 N. La force de l'Eurocode semble donc sécuritaire en se basant sur ce cas particulier, mais des analyses plus avancées et détaillées sont requises pour conclure de sa validité ou pas de manière générale.

TABLEAU 3.1 Tableau récapitulatif de la force numérique obtenue sur LS-DYNA et sa valeur prescrite par l'Eurocode

F	Force de contact (N)
$F_{LS-DYNA}$	1.54×10^9
$F_{Eurocode}$	6.32×10^9

3.4.9 Conclusions sur le modèle simplifié

Une étude préliminaire d'un modèle simplifié de collision a été conduite dans ce chapitre à l'aide d'une résolution explicite menée sur LS-DYNA et d'une résolution implicite menée sur ADINA. Une analyse paramétrique de plusieurs facteurs a été effectuée afin de déterminer les variables influençant l'impact. Il en est ressorti que la taille du maillage des éléments rentrant en contact a une influence sur la stabilité générale du modèle, notamment lorsque de faible

rigidités sont introduites. Il convient donc de choisir judicieusement le maillage d'un modèle numérique de contact. En faisant varier la rigidité de l'objet impactant, une importante modification de la courbe de force d'impact a été observée. Une plus grande rigidité implique un impact plus bref et intense. D'autre part, la valeur de la "souplesse du contact" introduite par l'algorithme de contact du logiciel ADINA a montré avoir une influence sur la réponse du modèle lors de la collision. En effet, plus la "souplesse de contact" s'approche d'une valeur nulle, plus le contact est court et intense. Il est donc important de bien choisir les paramètres de l'algorithme de contact du logiciel utilisé. Enfin, la vitesse initiale et la masse de l'objet impactant ont été identifiées comme des paramètres déterminants pour la caractérisation de l'impact dans ce modèle. Plus la masse et la vitesse initiale sont importantes, plus la force de contact est brève et intense. Il est donc nécessaire de choisir judicieusement ces différents paramètres dans le cadre d'une analyse numérique plus détaillée de l'impact d'un véhicule lourd sur un tablier de pont.

CHAPITRE 4 ANALYSE NUMÉRIQUE DE L'IMPACT D'UN CAMION TRANSPORTANT UNE EXCAVATRICE SUR UN TABLIER DE PONT

4.1 Présentation du modèle

4.1.1 Introduction

Un modèle numérique préliminaire plus réaliste de l'impact d'un véhicule sur un tablier de pont a été créé en assemblant différents modèles numériques en éléments finis disponibles en libre-accès (camion et excavatrice), hormis le tablier du pont. Le choix a été fait de modéliser une situation de plus en plus fréquente de collision entre un véhicule lourd et un tablier de pont : un impact d'une excavatrice transportée sur un camion-plateau, avec une hauteur cumulée dépassant la limite de hauteur autorisée sous le pont.

4.1.2 Les différents composants du modèle

Le modèle est constitué de 5 parties :

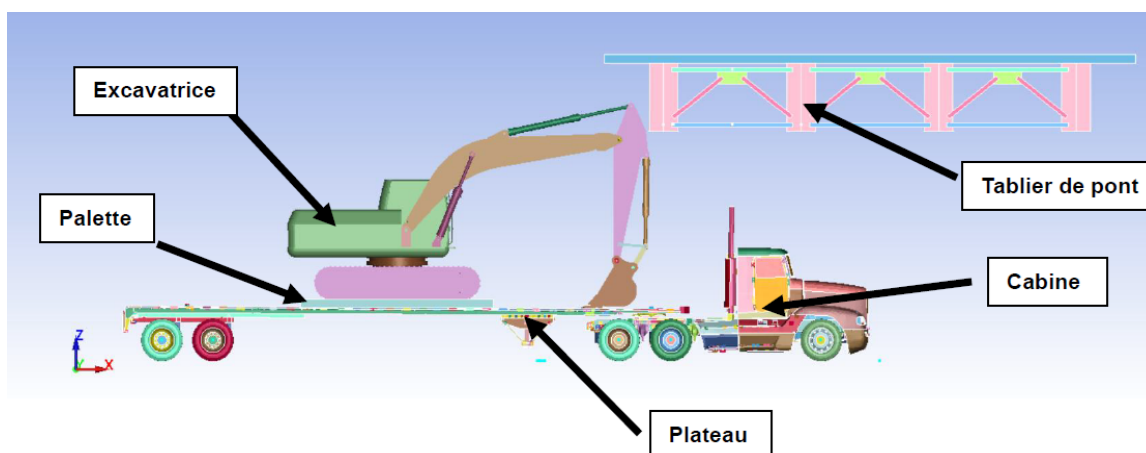


FIGURE 4.1 Aperçu du modèle détaillé sur LS-DYNA

Cabine

Le modèle en éléments finis de la cabine a été développé conjointement par le Battelle Memorial Institute (Oak Ridge National Laboratory, l'Université du Tennessee) sous la direction

du National Transportation Research Center Inc. (NTRCI). Le modèle est téléchargeable gratuitement sur leur site, qui propose également d'autres modèles de camions et de voitures dans le but d'effectuer des simulations de crash de voiture [37]. Le modèle utilisé représente la cabine d'un camion Freightliner FLD120 1992, à l'arrière duquel peut s'attacher une semi-remorque, permettant ainsi le transport de marchandises.



FIGURE 4.2 Freightliner FLD120 1992 [14]

Semi-remorque

La semi-remorque a été développée par le même regroupement de laboratoires mentionné précédemment [37]. Le modèle est basé sur une semi-remorque Pines 1988 48-ft, dont le conteneur a été supprimé pour en faire un camion à plateau permettant d'y installer l'excavatrice. La masse totale du camion, c'est-à-dire de la cabine et de la semi-remorque, est de 11.18 t.



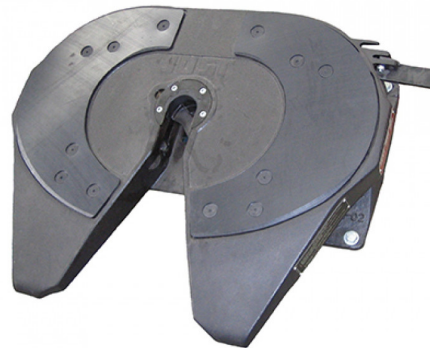
FIGURE 4.3 Semi-remorque 1988 Pines 48-ft

Connexion entre la cabine et la semi-remorque

Les modèles numériques de la cabine et de la semi-remorque étant deux modèles distincts, il a fallu les attacher ensemble pour former le camion au complet. Pour ce faire, la sellette d'attelage de la cabine est connectée au pivot d'attelage de la semi-remorque pour assurer que l'ensemble est correctement attaché.



(a) Pivot d'attelage



(b) Sellette d'attelage

FIGURE 4.4 Éléments de connexion entre la cabine et la semi-remorque

Palette

Une palette a été installée entre l'excavatrice et le plateau du camion afin de simplifier les effets de friction pour le contact camion/excavatrice. La masse de la palette est de 2.10 t.

Excavatrice

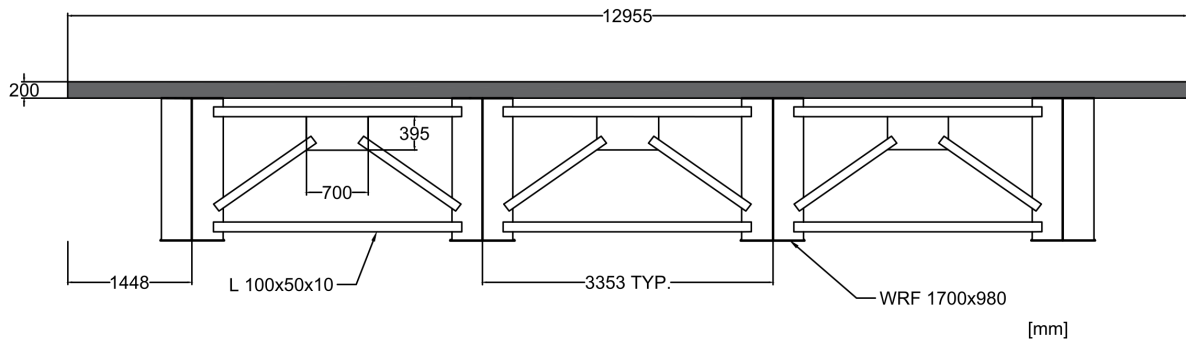
La modélisation numérique de l'excavatrice est basée sur l'excavatrice de la marque CAT, selon le modèle 320D. Le modèle numérique utilisé a été conçu par Gabriel Angel à l'aide du logiciel Catia v5 R19 [38]. La masse de l'excavatrice est de 22.63 t.



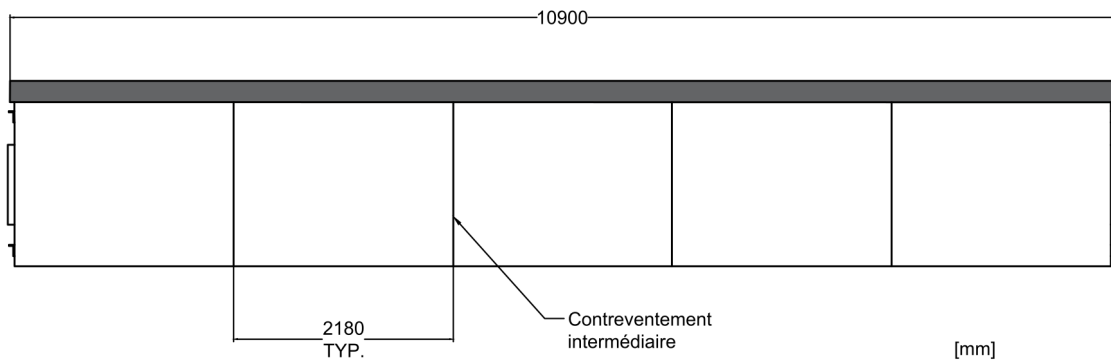
FIGURE 4.5 Excavatrice CAT 320D [15]

Tablier de pont

Un modèle simplifié d'un tablier de pont mixte en acier a été utilisé [39]. Le tablier est constitué de 4 poutres en acier, espacées chacune de 3 353 mm. La masse du tablier de pont est de 118.63 t. La géométrie du pont utilisé est montrée à la figure 4.6.



(a) Coupe Transversale



(b) Vue Longitudinale

FIGURE 4.6 Dimensions du tablier de pont

4.2 Modélisation sur LS-DYNA et hypothèses considérées

Choix du logiciel de modélisation numérique

Pour ce modèle numérique plus réaliste, le logiciel d'éléments finis LS-DYNA a été choisi pour sa meilleure prise en compte des phénomènes non-linéaires et rapides. De plus, ce logiciel met à disposition un large choix de matériaux pouvant être utilisés pour représenter de façon détaillée l'impact d'un véhicule sur un tablier de pont. Enfin, du fait de son utilisation à des fins de modélisation numérique de crash de véhicules, de nombreux modèles numériques en éléments finis sont disponibles librement sur internet.

Appuis du pont

Les deux extrémités des poutres principales sont contraintes en translation afin de représenter des appuis simples.

Attachement des cornières

À des fins de comparaison seulement, les double-cornières du tablier ont été détachées artificiellement pour évaluer l'effet sur le comportement du tablier à l'impact.

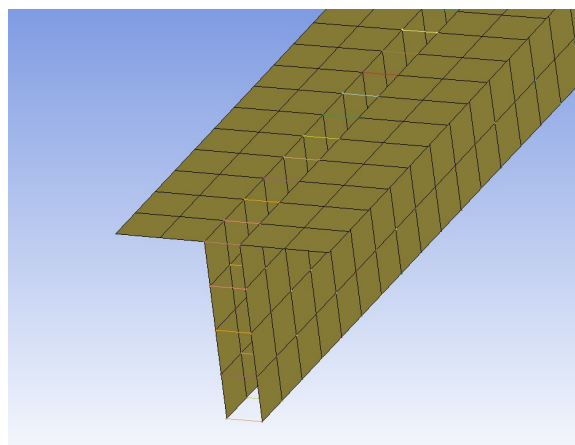


FIGURE 4.7 Détail des cornières

Conditions de contact entre le plateau du camion et l'excavatrice

Pour ce modèle, l'excavatrice et la palette sont simplement supportées par le camion. Il est important de noter qu'aucune fixation n'est introduite entre l'excavatrice et le camion afin

de réduire les temps de calcul et pour s'intéresser davantage au phénomène d'impact entre le bras de l'excavatrice et le tablier de pont.

Paramètres du modèle

La vitesse initiale appliquée à la semi-remorque est de 22.97 m/s soit 82.7 km/h. Lors d'un impact de véhicule sur une structure, il est pertinent d'introduire la notion de vitesse de déformation, étant donné que les matériaux peuvent être soumis à un chargement intense et bref qui sont susceptible de modifier le comportement des matériaux. Par exemple, sous des vitesses de déformation élevées, l'acier peut présenter un effet de durcissement dynamique engendrant une augmentation de sa résistance ainsi qu'une plus grande rigidité.

Afin de mieux représenter le comportement élastique-plastique du bras de l'excavatrice, c'est-à-dire la partie entrant en contact avec le tablier de pont, des paramètres supplémentaires liés à la vitesse de déformation du matériau ont été ajoutés, dont les valeurs sont résumées dans les tableaux 4.1 et 4.2 :

TABLEAU 4.1 Tableau récapitulatif des matériaux utilisés dans le modèle numérique

Élément	Module de Young (GPa)	Densité (kg/m^3)	Coefficient de Poisson
Dalle de béton	25	2400	0.3
Poutres principales	200	7850	0.3
Raidisseurs verticaux	200	7850	0.3
Goussets	200	7850	0.3
Cornières	200	7850	0.3
Cornières diagonales	200	7850	0.3
Bras de l'excavatrice	206	7850	0.3

TABLEAU 4.2 Paramètres de vitesse de déformation du matériau du bras de l'excavatrice

Élément	Limite d'élasticité R_e	Paramètre C	Paramètre p
Bras de l'excavatrice	350	40.4	5

Pour intégrer l'effet de la vitesse de déformation du matériau du bras de l'excavatrice, le modèle de Cowper et Symonds est utilisé [40], permettant d'appliquer un facteur sur la contrainte en employant l'expression suivante :

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_S(\varepsilon) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] \quad (4.1)$$

où σ_S désigne la contrainte quasi-statique du matériau et $\dot{\varepsilon}$ la vitesse de déformation.

Il est important de noter que le choix a été fait de ne pas utiliser de paramètres permettant d'appliquer des effets de vitesse de déformation sur la semelle de la poutre du tablier entrant en contact avec l'excavatrice, puisque l'hypothèse que cette partie serait moins sujette aux contraintes locales a été retenue. Cela permet également de réduire la complexité et les temps de calcul du modèle.

Éléments finis

Le tablier de pont a été modélisé à l'aide d'éléments de type "shell". Les différentes épaisseurs des éléments "shell" du tablier de pont sont regroupées dans le tableau suivant :

TABLEAU 4.3 Épaisseurs des éléments "shell" utilisés pour le tablier de pont

Partie	Épaisseur (mm)
Ame de la poutre	13
Semelle de la poutre	72
Raidisseurs verticaux	13
Goussets	10
Cornières	10
Cornières diagonales	10

La taille des éléments présents au niveau du contact entre le tablier du pont et le bras de l'excavatrice est récapitulée dans le tableau 4.4 :

TABLEAU 4.4 Taille des éléments impliqués dans le contact excavatrice/tablier

Partie	Dimension (mm)
Bras de l'excavatrice	23.97
Semelle de la poutre - axe Y (transversale à la direction d'impact)	15
Semelle de la poutre - axe X (tangente à la direction d'impact)	25

Friction

Pour modéliser la friction entre les différentes surfaces du modèle, une fonction d'interpolation est définie dans LS-DYNA afin de fluidifier la transition entre la friction statique μ_s et la friction dynamique μ_d [41], dont la relation est établie par la formule suivante :

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c|v|} \quad (4.2)$$

où μ est la friction et v est la vitesse relative entre le nœud "esclave" et le segment "maître", et c est un coefficient choisi arbitrairement.

Pour l'interaction entre les poutres du pont et le camion, un coefficient statique et dynamique de friction de 0.3 a été imposé, en se basant sur l'article de El-Tawil et al. [42].

Les valeurs de friction entre les différentes parties du modèle sont rassemblées au tableau 4.5 :

TABLEAU 4.5 Friction appliquée entre différentes interfaces du modèle numérique

Interface	Coefficient μ_s	Coefficient μ_d
Pelle/Plateau	0.4	0.4
Excavatrice et Camion/Tablier de pont	0.3	0.3
Chenilles de l'excavatrice/Palette	0.4	0.4
Palette/Plateau du camion	0	0
Roues du camion/Route	0	0

Les différentes interfaces sont représentées à la figure 4.8 :

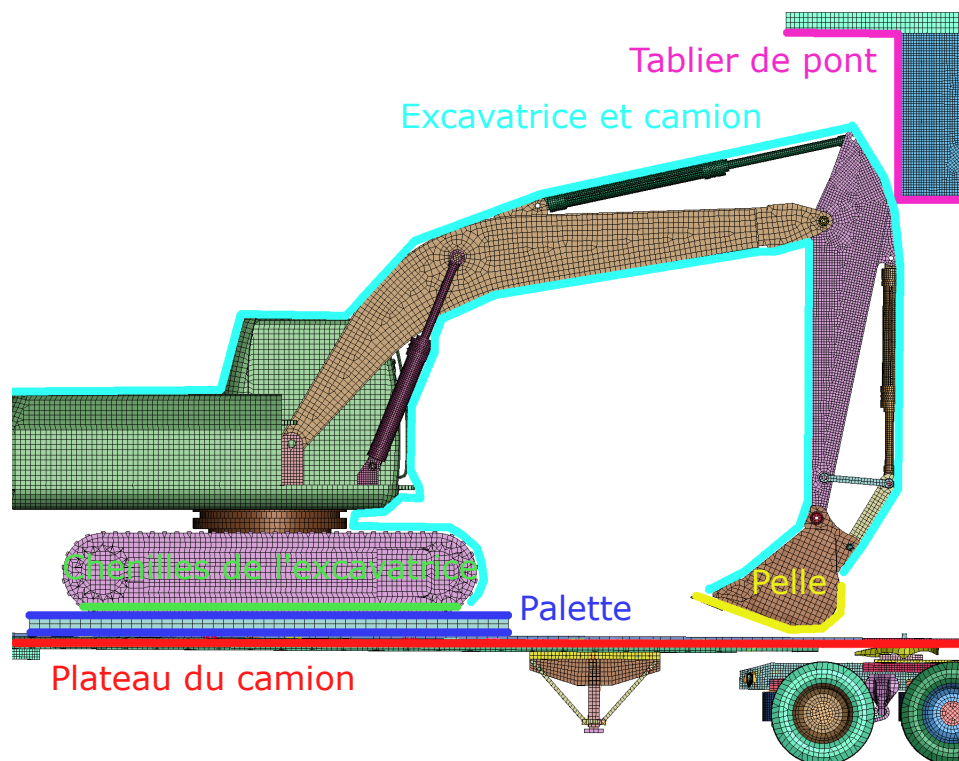


FIGURE 4.8 Aperçu des différentes interfaces du modèle

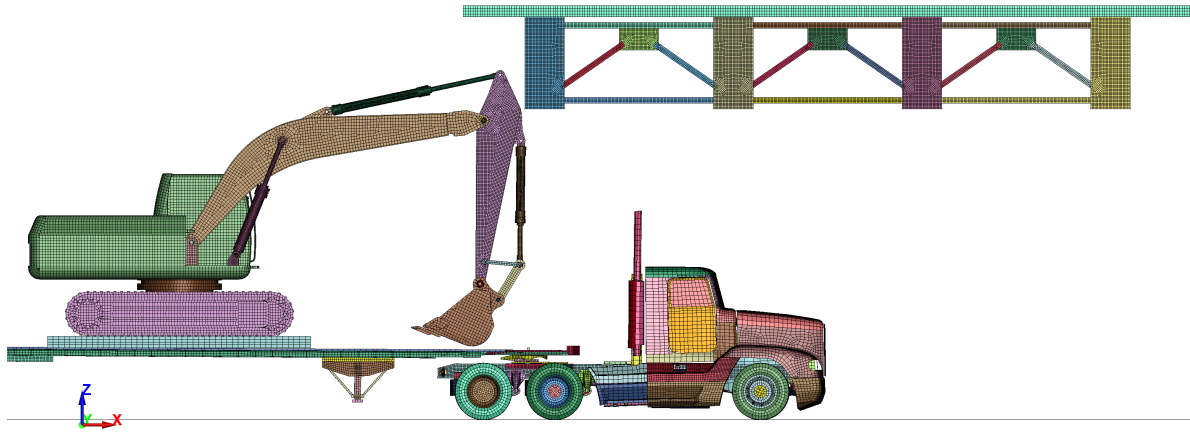
Note : La friction entre les roues du camion et la chaussée est négligée dans cette étude, ainsi que la flexibilité de la chaussée.

4.3 Analyse et résultats du modèle

Lors de la simulation, on observe que la semi-remorque avance à la vitesse prescrite jusqu'à rentrer en collision avec la semelle de la première poutre, puis l'excavatrice est stoppée en raison du choc et recule. La semi-remorque cependant continue d'avancer mais sa vitesse diminue progressivement suite à l'impact, comme le montre la figure 4.13. Le contact se produit précisément entre le bras de l'excavatrice et la semelle de la poutre à une hauteur de 5.514 m.

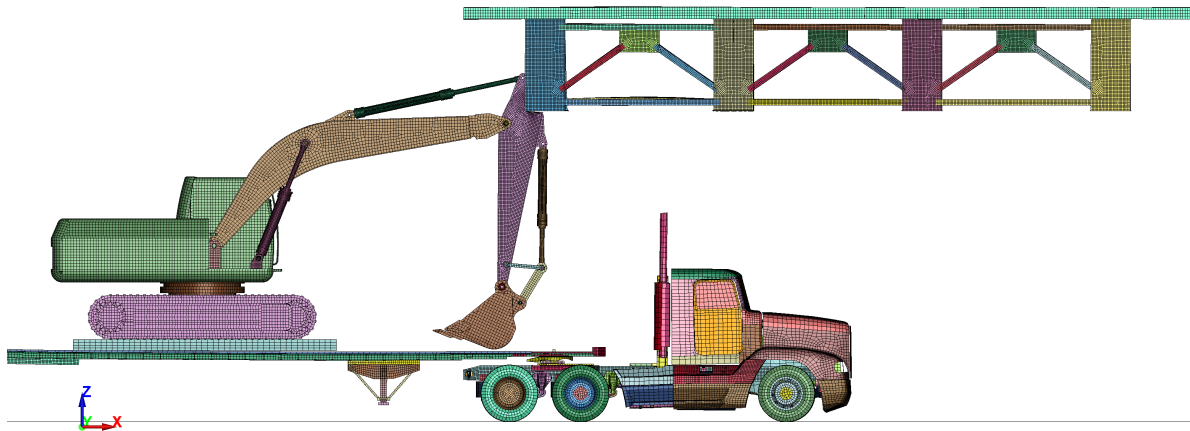
Différentes étapes de la collisions sont montrées à la figure 4.9, permettant de suivre le déroulement de l'impact.

Tractor Version 2010-05-19
Time = 0



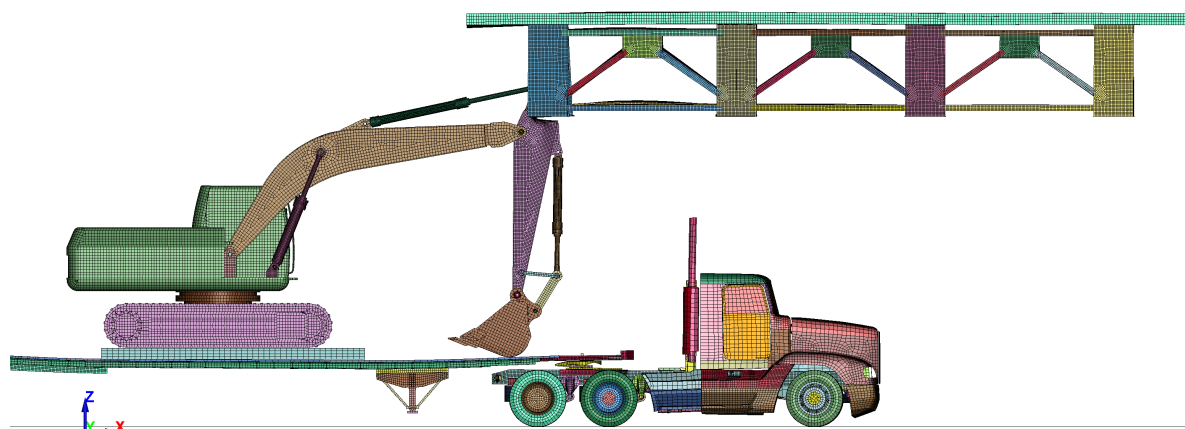
(a) Vue latérale de l'impact à $t = 0s$

Tractor Version 2010-05-19
Time = 0.019999



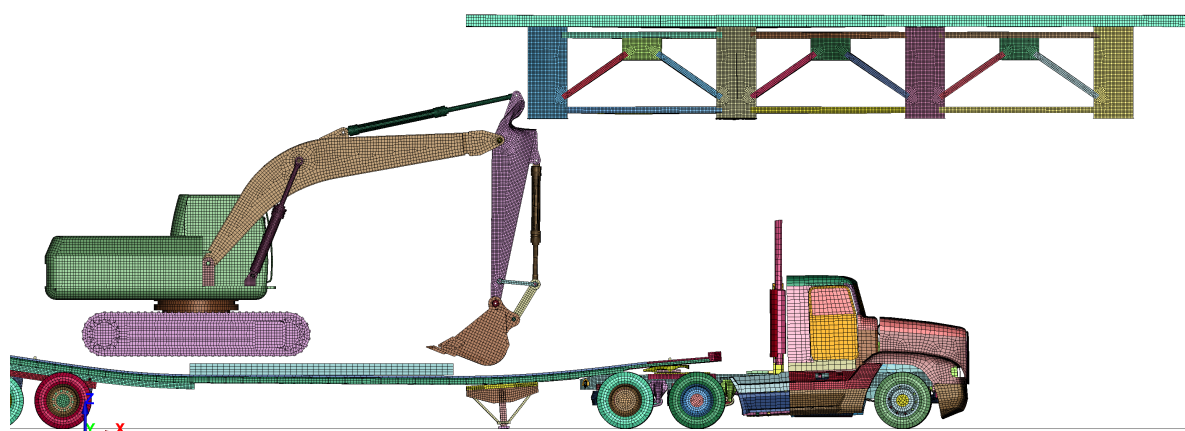
(b) Vue latérale de l'impact à $t = 0.02s$

Tractor Version 2010-05-19
Time = 0.039999



(c) Vue latérale de l'impact à $t = 0.04s$

Tractor Version 2010-05-19
Time = 0.11



(d) Vue latérale de l'impact à $t = 0.11s$

FIGURE 4.9 Déroulement de l'impact en vue de coté

Le résultat de la force de contact selon la direction de déplacement du véhicule est montré à la figure 4.10. On observe pour l'axe X un pic de force peu de temps après le choc suivi d'une force de plus longue et de plus forte intensité. Le maximum de force de contact entre l'excavatrice et le tablier de pont est atteint aux environs de $t = 0.04$ secondes avec une valeur de 14 797 kN.

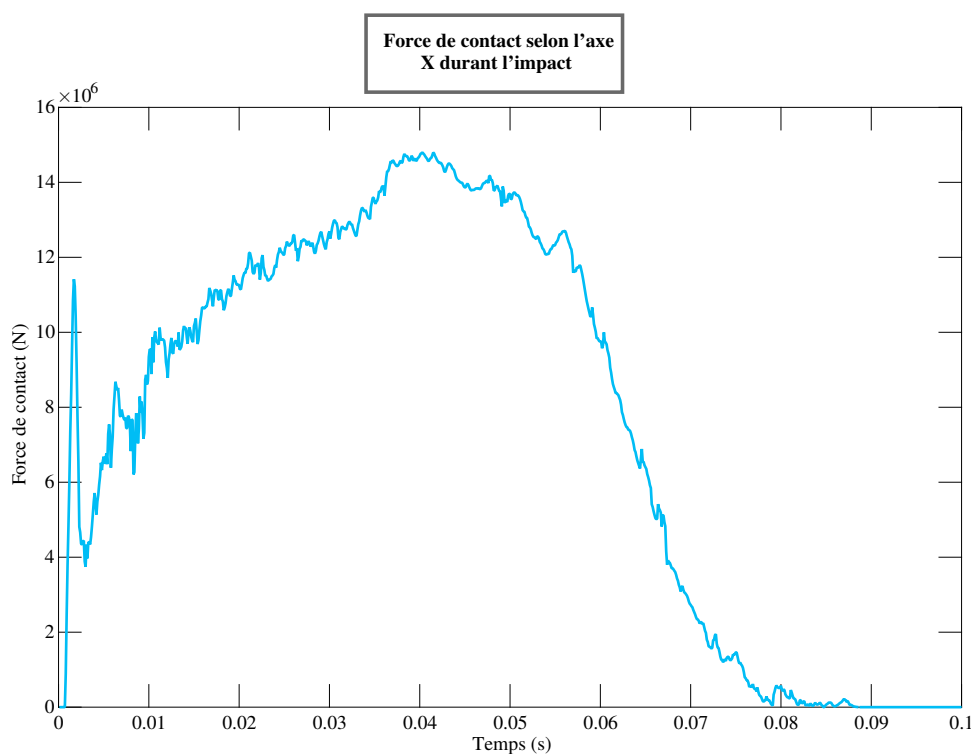


FIGURE 4.10 Force de contact selon l'axe X obtenue avec le modèle numérique réaliste

Les forces de contact selon la direction Y et Z sont également extraites et représentées respectivement aux figures 4.11 et 4.12, cependant il est apparent que ces forces sont moins fortes en intensité que la force d'impact selon la direction X.

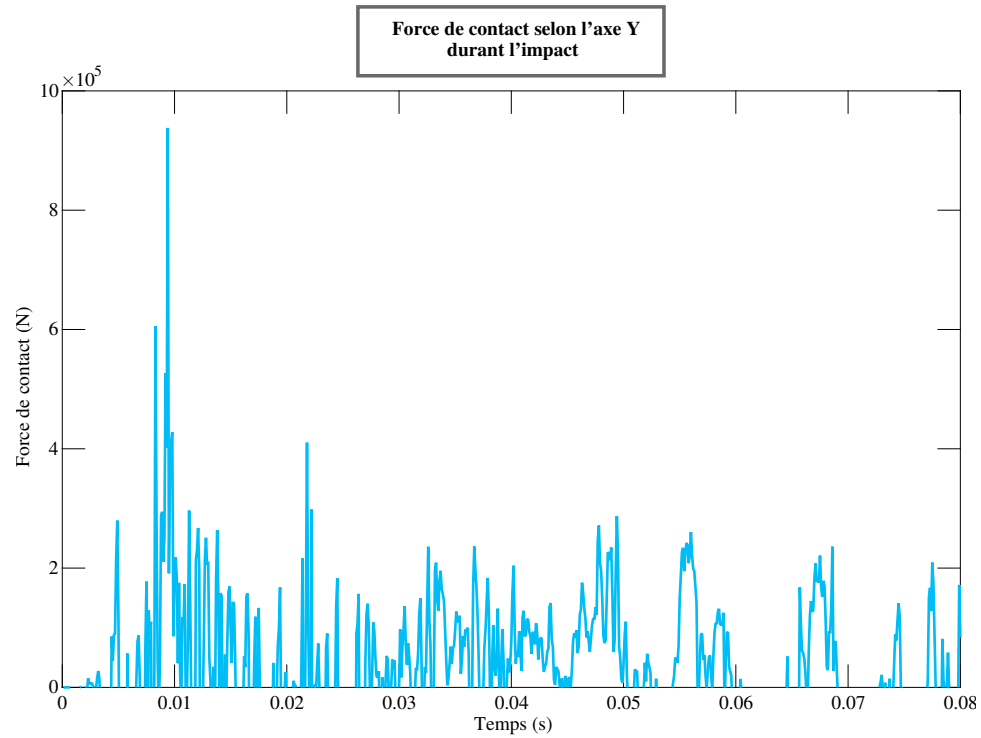


FIGURE 4.11 Force de contact selon l'axe Y obtenue avec le modèle numérique réaliste

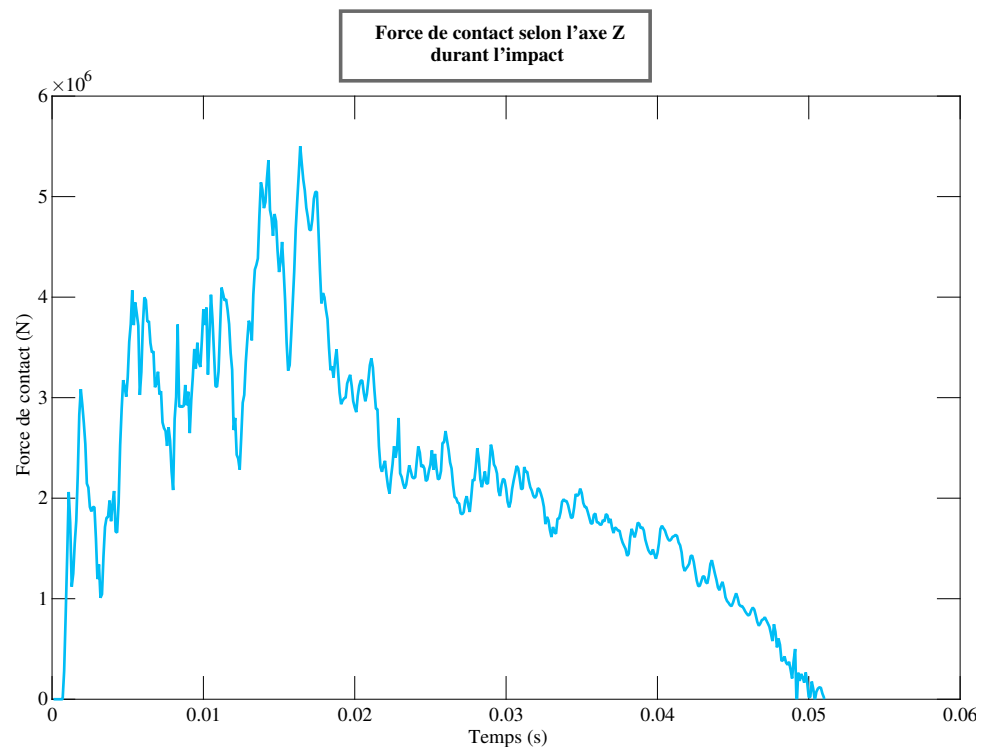


FIGURE 4.12 Force de contact selon l'axe Z obtenue avec le modèle numérique réaliste

La vitesse selon la direction de déplacement du camion est extraite par la suite, afin d'observer la diminution progressive de la vitesse durant l'impact. Ce résultat est montré à la figure 4.13.

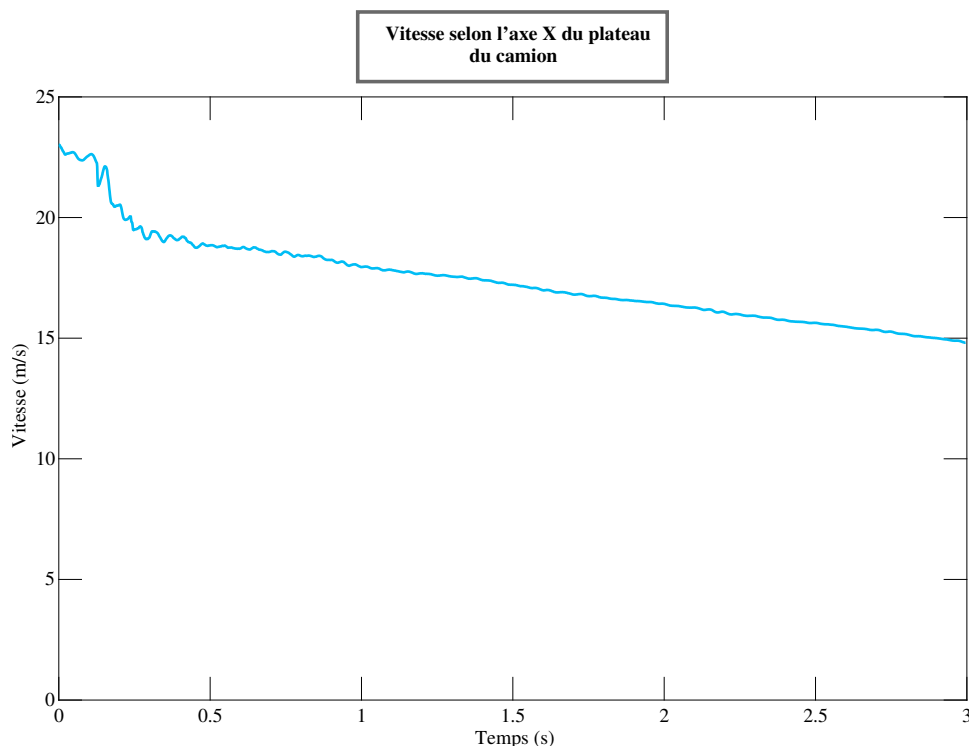
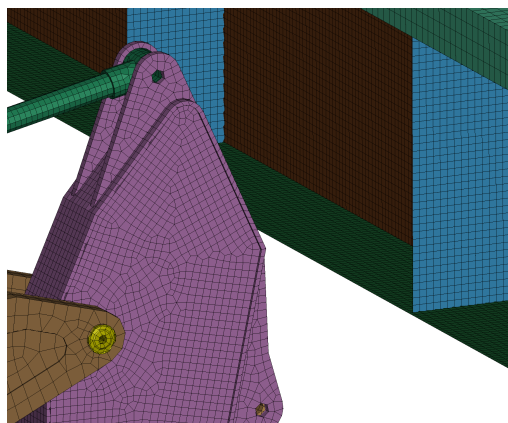


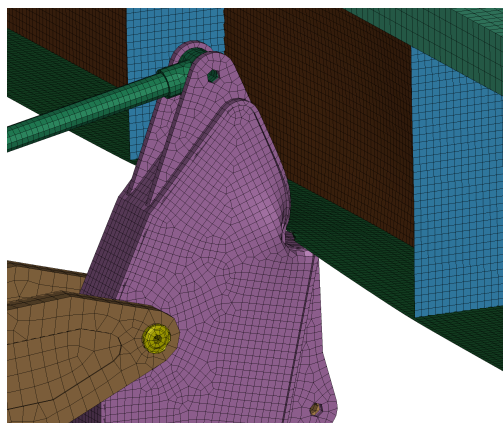
FIGURE 4.13 Vitesse selon l'axe X du plateau du camion obtenue avec le modèle numérique réaliste

4.3.1 Dommages observés sur la structure

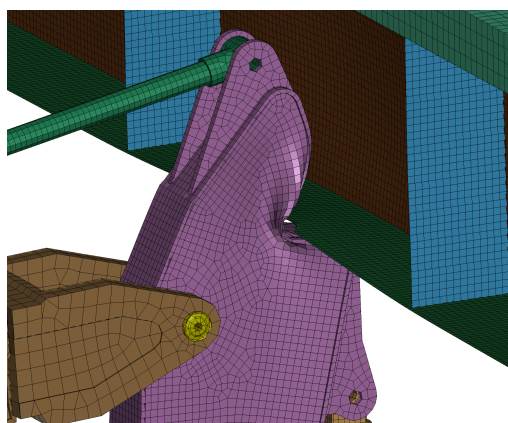
Le contact entre l'excavatrice et le tablier de pont se produit au niveau de la semelle inférieure de la poutre, à équidistance de deux raidisseurs verticaux. On observe une déformation locale sur la semelle inférieure au niveau de l'impact, conduisant à une torsion de la poutre. L'énergie de déformation se propage ensuite dans les treillis, où un flambement important est observé sur les treillis et les diaphragmes inférieurs situés près des deux raidisseurs verticaux adjacents à la zone d'impact. Un flambement moins prononcé est constaté sur les treillis et diaphragmes appartenant à la deuxième rangée de raidisseurs verticaux à partir du point d'impact. Le déroulement chronologique de la collision permettant d'observer les différents dommages dans la zone de contact est montré à la figure 4.14. D'autre part, une vue de dessus de la collision est montrée à la figure 4.15, afin de montrer le flambement du treillis.



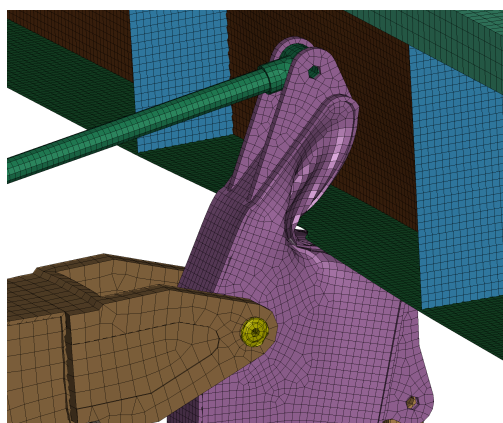
(a) Déformations observées à $t = 0s$



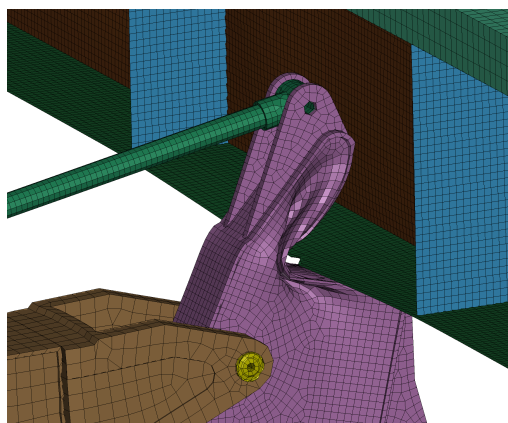
(b) Déformations observées à $t = 0.01s$



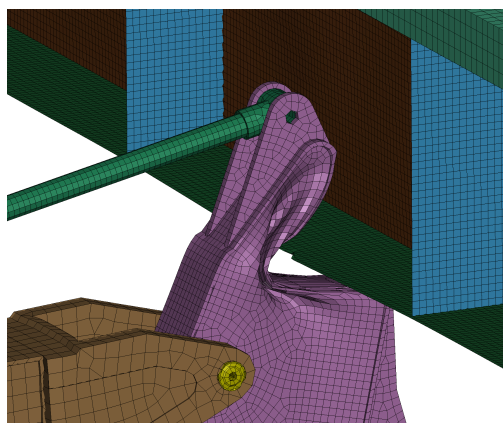
(c) Déformations observées à $t = 0.02s$



(d) Déformations observées à $t = 0.04s$

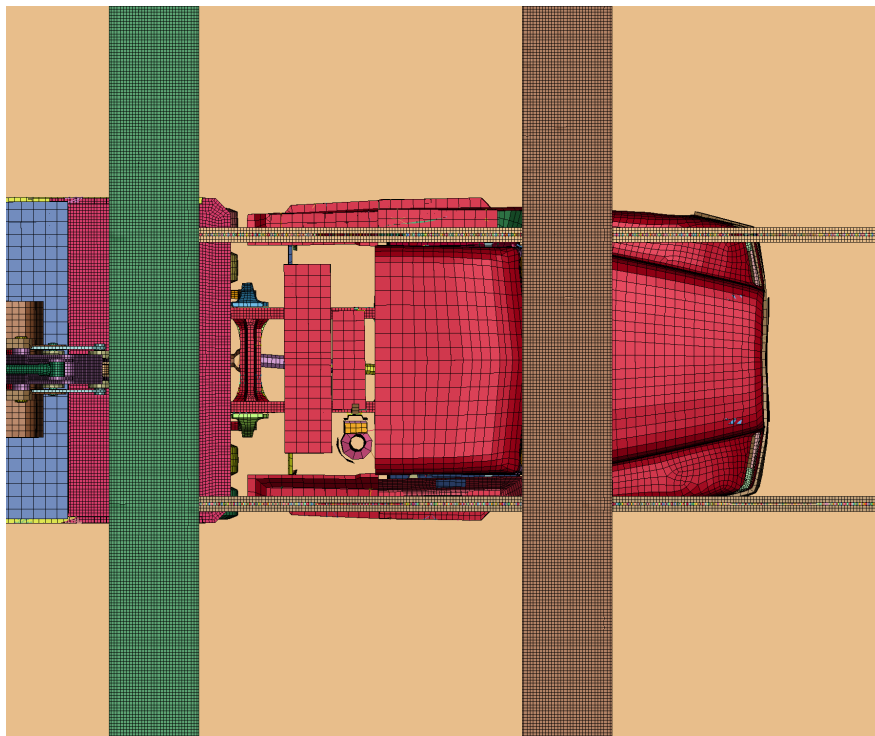


(e) Déformations observées à $t = 0.07s$

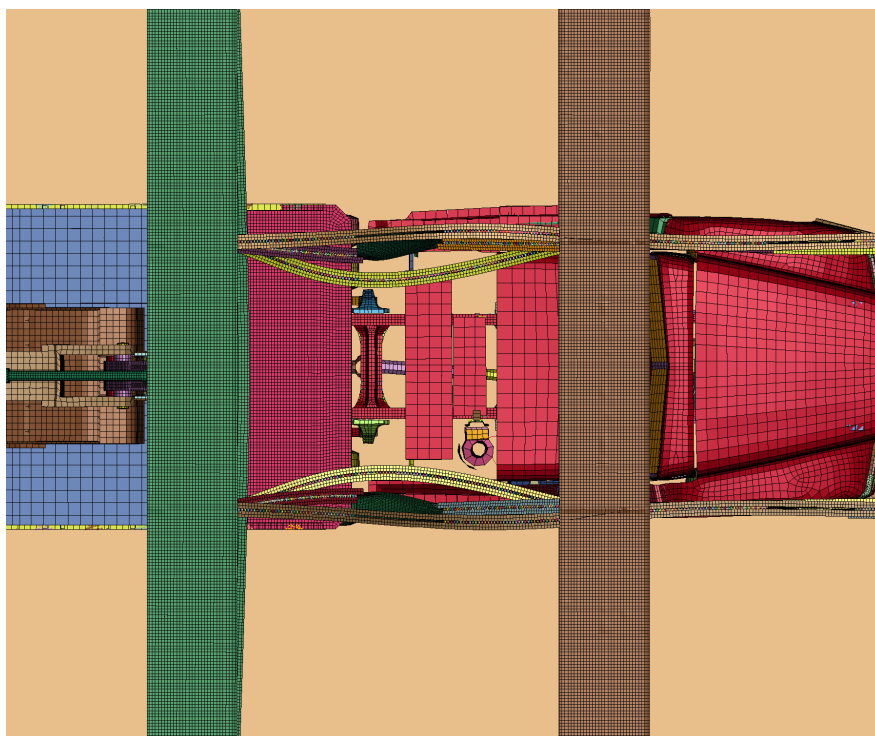


(f) Déformations observées à $t = 0.08s$

FIGURE 4.14 Déformation plastique de la poutre lors de la collision



(a) Poutres du tablier vues de dessus, $t=0s$



(b) Poutres du tablier vues de dessus, $t=0.03s$

FIGURE 4.15 Déformation des cornières et des éléments du tablier de pont lors de l'impact, vue de dessus

Les dommages observés dans le modèle numérique peuvent être comparés aux dommages observés lors d'accidents réels. La figure 4.16 montre les conséquences d'un accident survenu en 2016 à l'Assomption (Québec), durant lequel un engin de construction transporté par un camion-plateau a percuté le dessous d'un tablier situé sur l'autoroute 40. Une vue de dessous du modèle numérique est représentée à la figure 4.17 à fin de comparaison.



(a) Édouard Berton, 2016 [2]



(b) Maxime DELAND, Agence QMI, 2016 [3]

FIGURE 4.16 Photos de comparaison avec les dommages observés un accident réel

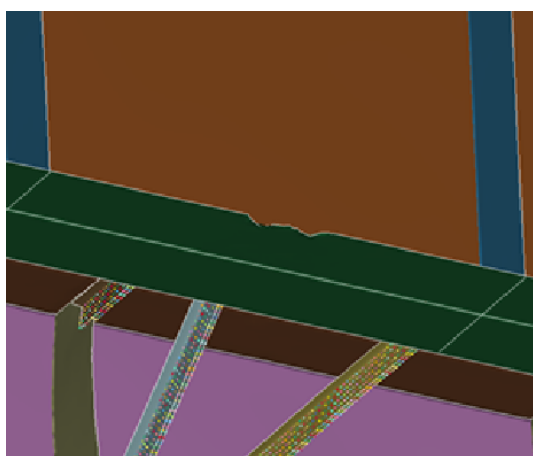


FIGURE 4.17 Déformations plastiques observées sur le modèle numérique LS-DYNA

On remarque un comportement similaire aux dommages observés sur le modèle numérique.

4.3.2 Comparaison avec l'Eurocode

D'après les résultats précédents, il apparaît que la force de contact maximale obtenue numériquement est largement supérieure à la force statique équivalente de 500 kN prescrite par l'Eurocode. Cela confirme bien les résultats des autres études portant sur l'impact de véhicules lourds sur les tabliers de pont. Cependant, il faut noter que les hypothèses simplificatrices telles que l'absence de fixations entre l'excavatrice et le plateau du camion peuvent amener à une surestimation de la force de contact obtenue numériquement par rapport à la force de contact qui pourrait être obtenue expérimentalement.

4.3.3 Effet de l'attachement des cornières sur la force de contact

Dans un second temps, les cornières ont été désolidarisées afin d'observer l'impact de l'excavatrice sur un tablier de pont rendu plus élastique. Les liens rigides précédemment introduits pour unifier les cornières ont été enlevés et la force de contact selon la direction de déplacement du véhicule a été extraite après simulation du modèle.

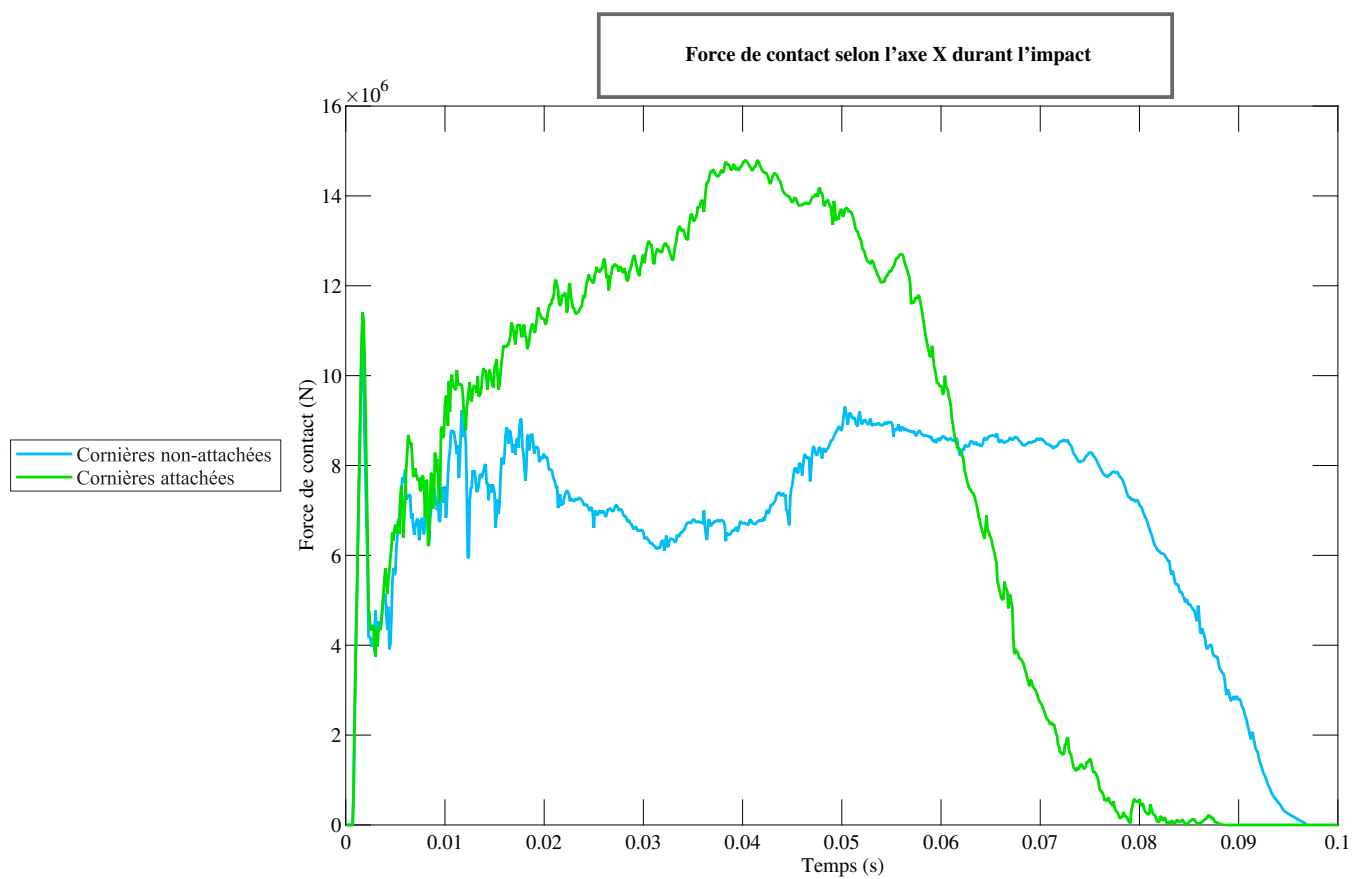


FIGURE 4.18 Comparaison de la force de contact selon l'axe X en fonction de l'attachement des cornières

On remarque que la force d'impact est nettement plus importante lorsque les cornières sont attachées. On peut émettre l'hypothèse que l'attachement des cornières rend la structure plus rigide et donc moins élastique, amenant ainsi à une plus grande force de contact durant l'impact. Finalement, il est intéressant de noter que le choix d'attacher les cornières ou non n'influence pas le premier pic d'impact observé vers $t=0.002$ s.

4.3.4 Effet de la vitesse initiale sur la force de contact

Ensuite, plusieurs vitesses initiales du camion sont testées et les résultats sont montrés à la figure 4.19.

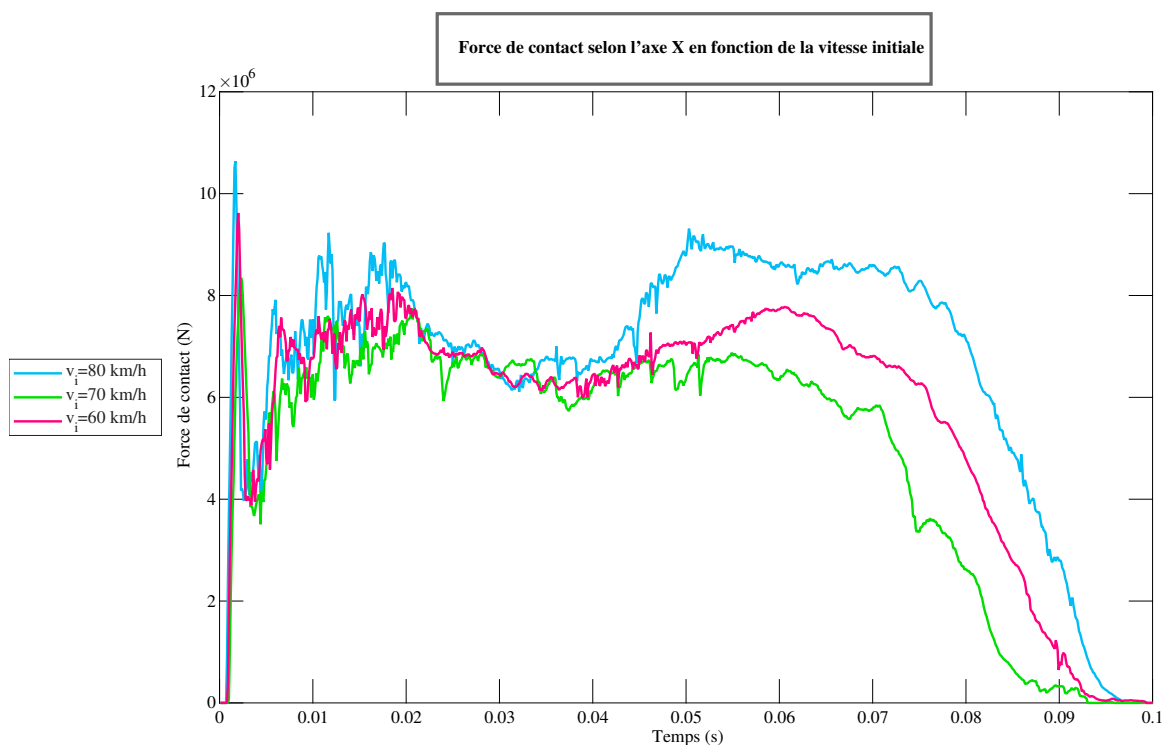


FIGURE 4.19 Comparaison de la force de contact selon l'axe X en fonction de la vitesse initiale du camion

On remarque que la vitesse du camion et de l'excavatrice influence l'intensité du choc, cependant l'écart des forces de contact mesurées est nettement plus important lors de la période de "relâchement", c'est-à-dire une fois que l'excavatrice recule et que l'intensité des forces de contact diminue.

TABEAU 4.6 Récapitulatif des résultats de forces de contact en fonction de la vitesse initiale

Vitesse initiale v_i (km/h)	Force d'impact maximale F_{max} (kN)
60	8 348
70	9 621
82.7 (ref)	10 638

CHAPITRE 5 CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire était de proposer une analyse numérique préliminaire de l'impact d'un véhicule lourd sur un tablier de pont. Il est apparu que ce phénomène est sous-estimé dans la littérature, bien que ces types d'accidents puissent être observés de façon récurrente sur les autoroutes. Dans cette étude, le cas d'une excavatrice montée sur un semi-remorque a été pris en compte.

5.1 Synthèse des travaux

Une étude simplifiée du contact entre deux objets a été présentée. Cette introduction au modèle réaliste a permis de comparer l'algorithme de calcul du contact entre deux logiciels (LS-DYNA et ADINA), et la calibration a été réalisée en faisant varier les principaux paramètres influençant le contact dans les deux logiciels. Les résultats de la force de contact entre les modèles ADINA et LS-DYNA ont semblé relativement proches, dont l'écart peut être expliqué par la prise en compte des phénomènes non-linéaires dans le logiciel LS-DYNA, ce que le logiciel ADINA ne considère pas.

Plusieurs conclusions ont pu être tirées à partir du modèle simplifié :

- La rigidité de l'objet impactant influence grandement la durée et l'intensité de la force de contact. Des instabilités numériques peuvent être observées en dessous d'une certaine rigidité.
- La "souplesse" du contact dans le logiciel ADINA peut être modifiée à l'aide du paramètre de "compliance".
- La masse du tablier de pont a peu d'influence sur l'intensité de la force de contact.
- Une surface rigide représentant le plateau et les roues du camion a été ajoutée à partir du modèle simplifié afin de tenir compte de la friction entre le véhicule et la route. Cependant, le coefficient de friction n'a pas semblé avoir de grande influence sur la force d'impact.
- Pour les cas étudiés, une force d'impact inférieure à la prédiction de l'Eurocode a été obtenue des modèles numériques.

Ensuite, un modèle numérique préliminaire plus réaliste a été réalisé, comprenant un semi-remorque transportant une excavatrice, heurtant un tablier mixte acier-béton. Ce modèle avait pour but de mieux représenter les différents phénomènes entrant en jeu lors de la collision, mais qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle simplifié. Afin de mieux tenir compte de la plastification de l'excavatrice au contact du tablier de pont, le matériau utilisé pour le bras de l'excavatrice a été choisi afin de tenir compte de la vitesse de déformation lors de l'impact de l'acier.

Les conclusions suivantes ont pu être tirées à partir du modèle détaillé :

- Deux phases de contact ont pu être observées. Une première a l'allure d'un pic d'une intensité importante mais de courte durée, suivie par une force plus longue et progressive, atteignant le maximum de force de contact.
- Bien que l'étude n'ait pas porté sur plusieurs configurations de ponts et de véhicules, l'endommagement de la structure suite à l'impact simulé numériquement est relativement semblable aux dommages observés dans la réalité.
- La force obtenue numériquement est supérieure à la force statique équivalente prescrite par l'Eurocode.

5.2 Limitations de la solution proposée

Ce mémoire de maîtrise constitue un travail préliminaire visant à explorer des modèles numériques allant de simplifié à plus avancé. Les résultats obtenus de la modélisation numérique réaliste de l'impact d'une excavatrice sur un tablier de pont restent limités et d'autres études plus poussées sont requises pour confirmer certaines conclusions. Il n'a pas été question d'un choc "dur" ou "mou" ; par conséquent la comparaison avec la formule de l'Eurocode reste à approfondir. De plus, le scénario présenté dans cette étude ne prend pas en compte l'état structurel et le niveau de détérioration initial du pont. Les lois de comportement des matériaux ont été choisis en émettant des hypothèses qu'il resterait à valider avec des études expérimentales. La condition d'un modèle stable numériquement engendre une simplification parfois trop importante de certains paramètres (matériaux, géométrie, maillage...). De plus, plusieurs hypothèses simplificatrices dans le modèle numérique pourraient affecter la force d'impact, telles que l'absence de fixations entre l'excavatrice et le plateau du camion.

5.3 Améliorations futures

Des études futures pourraient inclure les effets suivants :

- Conditions initiales
 - Vitesse du véhicule
 - Hauteur d'impact sur le tablier de pont
 - Angle d'impact
 - Coefficient de friction en fonction de la condition de la route (pluie, neige...)
- Type de véhicule
 - Semi-remorque porte-conteneur
 - Camion transportant un engin agricole
 - Bus et autocars
- Type de tablier de pont
 - Tablier en béton précontraint
 - Tablier à caissons
 - Tablier en treillis métallique

Finalement, il serait pertinent d'effectuer une étude expérimentale de l'impact d'un véhicule lourd sur un tablier de pont afin de valider les résultats obtenus par le modèle numérique.

RÉFÉRENCES

- [1] European Committee for Standardization (CEN), “Eurocode 1 : Actions on structures – Part 1-7 : General actions – Accidental actions,” <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=138>, 2006, eN 1991-1-7 :2006.
- [2] E. Berton *et al.*, “Finite element modeling of the impact of heavy vehicles on highway and pedestrian bridge decks,” vol. 199, p. 2451–2456. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817338742>
- [3] M. Deland, <https://www.tvanouvelles.ca/2016/06/28/lautoroute-40-ouest-fermee-fermee-pour-une-duree-indeterminee>, 2016.
- [4] J. Henn, “Foggy morning canopener truck crash at the 11foot8 bridge,” <https://11foot8.com/foggy-morning-canopener-truck-crash-11foot8-bridge/>, 2018.
- [5] Y. Jing, Z. J. Ma et D. B. Clarke, “Full-scale lateral impact testing of prestressed concrete girder,” vol. 17, n°. 6, p. 947–958. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.201500224>
- [6] K. Oppong, D. Saini et B. Shafei, “Characterization of impact-induced forces and damage to bridge superstructures due to over-height collision,” vol. 236, p. 112014. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029621001644>
- [7] L. Xu *et al.*, “Finite-element and simplified models for collision simulation between overheight trucks and bridge superstructures,” vol. 18, n°. 11, p. 1140–1151. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000472>
- [8] L. Kong, J. Zhang et W. Han, “Investigation on damage and simplified collision force of prestressed concrete box bridge subjected to over-height truck collision,” dans *2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*. IEEE, p. 37–42. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9110244/>
- [9] Ozdagli, “Quantitative error analysis of bilateral filtering,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, n°. 2, p. 202–206, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6892949>
- [10] K. Oppong *et al.*, “Characterization of damage to steel bridge girders subjected to over-height vehicle collision,” vol. 221, p. 108926. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X24004760>
- [11] Berton, “Méthode de prédiction et analyse par éléments finis des collisions de véhicules avec les superstructures de ponts,” Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté

- de génie, Département de génie civil, Sherbrooke, Canada, 2021.
- [12] T. Horberry, M. Halliday et A. G. Gale, “Bridge strike reduction : Optimizing the design of markings,” *Accident Analysis and Prevention*, vol. 34, p. 581–588, 2002.
 - [13] *ADINA Theory and Modeling Guide*, Version 9.8 éd., ADINA RD, Inc, 2022.
 - [14] <https://www.vanderhaags.com/Search-Results.php?manufacturer=freightliner&model=fld120&inventorytype=parts-unit>.
 - [15] Site internet cat. https://www.cat.com/fr_DZ/products/new/equipment/excavators.html. CAT.
 - [16] A. K. Agrawal, “Bridge vehicle impact assessment - final report.”
 - [17] WSYR, “Dot shares exactly how many trucks have hit the bridge over onondaga lake parkway,” <https://www.localsyr.com/news/trucks-are-still-striking-onondaga-lake-parkway-bridge-despite-dot-efforts-recent-data-show/>, 2023.
 - [18] W. S. D. of Transportation (WSDOT), “Bridge List M 23-09.11 : Bridge List,” <https://www.wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/m23-09/Bridgelist.pdf>, janv. 2024.
 - [19] A. K. Agrawal, “Bridge vehicle impact assessment - task 1 : Problem background investigation november 2008.”
 - [20] C. C. Fu, J. R. Burhouse et G.-L. Chang, “Overheight vehicle collisions with highway bridges,” vol. 1865, n°. 1, p. 80–88. [En ligne]. Disponible : <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1865-12>
 - [21] Q.-H. Nguyen et M. Hjiatj, “Nonlinear time-dependent behavior of composite steel-concrete beams,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 142, n°. 5, p. 04016016, 2016.
 - [22] P. Heidenreich et K. Bartko. (2025, mars) East edmonton overpass damaged after being hit by semi-truck. <https://globalnews.ca/news/11064926/east-edmonton-overpass-damaged-semi-truck/>.
 - [23] K. Bartko. (2023, juin) Semi collision damages whitemud overpass at southeast edmonton henday interchange. <https://globalnews.ca/news/9773939/whitemud-drive-anthony-henday-drive-semi-collision-june-2023/>.
 - [24] B. Braga. (2025, mars) Excavator on trailer decimates highway overpass at interstate speeds. <https://www.thedrive.com/news/excavator-on-trailer-decimates-highway-overpass-at-interstate-speeds>.
 - [25] S. Bell. (2021, juill.) Dump truck crashes into georgia bridge so hard it moves six feet, is now being demolished. <https://www.carscoops.com/2021/07/dump-truck-crashes-into-georgia-bridge-so-hard-it-moves-six-feet-is-now-being-demolished/>.

- [26] C. Seto. (2016, mars) Trucker who crashed dump truck in burlington skyway sentenced to jail time. <https://www.cbc.ca/news/canada/hamilton/trucker-who-crashed-dump-truck-in-burlington-skyway-sentenced-to-jail-time-1.3683838>.
- [27] Canadian Standards Association (CSA), “CAN/CSA S6-19 : Code canadien sur le calcul des ponts routiers,” <https://www.csagroup.org/store/product/2428107/>, 2019, norme officielle canadienne.
- [28] A. A. of State Highway et T. O. (AASHTO), “Aashto lrfd bridge design specifications,” <https://www.ihs.com/products/aashto-lrfd-bridge-design-specifications-8th-edition-2017.html>, 2017, iSBN-13 : 978-1560516545.
- [29] K. Heng, R. Li et H. Wu, “Damage assessment of simply supported double-pier bent bridge under heavy truck collision,” vol. 27, n°. 5, p. 04022021. [En ligne]. Disponible : <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001851>
- [30] X. Xu *et al.*, “Vehicle collision with RC structures : A state-of-the-art review,” vol. 44, p. 1617–1635. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012422007603>
- [31] H. Mraih *et al.*, “A review of energy-dissipating systems for over-height vehicle bridge impact mitigation,” vol. 330, p. 119892. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029625002822>
- [32] K. A. Harries *et al.*, “UPDATED RESEARCH FOR COLLISION DAMAGE AND REPAIR OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS,” National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., Rapport technique, May 2012, final Report, University of Pittsburgh and University of Cincinnati.
- [33] M. Yang et P. Qiao, “Analysis of cushion systems for impact protection design of bridges against overheight vehicle collision,” vol. 37, n°. 12, p. 1220–1228. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X10001077>
- [34] R. Cao, A. K. Agrawal et S. El-Tawil, “Overheight impact on bridges : A computational case study of the skagit river bridge collapse,” vol. 237, p. 112215. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029621003655>
- [35] H. Tabatabai et A. Nabizadeh, “Stress change calculations in accidentally damaged prestressed bridge girders,” vol. 18, n°. 1, p. 3–17. [En ligne]. Disponible : <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.3233/BRS-220197>
- [36] S. Mowlavi et K. Kamrin, “Contact model for elastically anisotropic bodies and efficient implementation into the discrete element method,” *Granular Matter*, vol. 23, n°. 4, 2021.

- [37] O. R. N. Laboratory. (2010) Fem models for semitrailer trucks. <https://thyme.ornl.gov/FHWA/TractorTrailer/>.
- [38] G. Angel. (2014, févr.) Retro cat 320d. <https://grabcad.com/library/retro-cat-320d-1>.
- [39] N. Bouaanani, “Communications personnelles,” 2024-2026.
- [40] G. R. Cowper et P. S. Symonds, *Strain-Hardening and Strain-Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams*. Providence, RI, USA : Division of Applied Mathematics, Brown University, 1957.
- [41] LSTC, *LS-DYNA® Theory Manual*, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), juin 2018, revision r :10113, 06/21/18.
- [42] S. El-Tawil, E. Severino et P. Fonseca, “Vehicle collision with bridge piers,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 10, n^o. 3, p. 345–354, 2005.