
Identifications des paramètres influençant la résistance au choc des portes d'écluses

Auteur : Quoibion, Maurine

Promoteur(s) : Rigo, Philippe

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité approfondie

Année académique : 2015-2016

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/1386>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université
de Liège

Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Identifications des paramètres influençant la résistance au choc des portes d'écluses

Mémoire de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master en Ingénieur Civil des Constructions à finalité approfondie

par

Maurine Quoibion

Année académique 2015-2016

COMPOSITION DU JURY :

PHILIPPE RIGO (PROMOTEUR)

LOÏC BULDGEN (COLLABORATEUR)

VINCENT DENOËL

DAVID MONFORT (MEMBRE EXTÉRIEUR)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, Monsieur P. Rigo qui m'a permis de réaliser ce travail de fin d'études ainsi que pour les conseils et le temps qu'il m'a consacrés.

Je souhaite également remercier Messieurs Loïc Buldgen et Timothée Pire pour l'aide qu'ils m'ont apportée concernant la conception des modèles sous les logiciels Patran, LS-DYNA et LBR-5 ainsi que pour l'attention portée à mes interrogations.

J'adresse ma reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

Je tiens aussi remercier tous les professeurs, membres du personnel académique et personnes extérieures qui ont contribué à ma formation depuis le début de mon cursus.

Enfin, je souhaite exprimer ma plus vive reconnaissance à toutes les personnes, famille, amis et professeurs qui m'ont aidée et soutenue lors de l'élaboration de ce travail.

Résumé

Titre : Identifications des paramètres influençant la résistance au choc des portes d'écluses.

Réalisé par : Maurine Quoibion

Section : Master en Ingénieur Civil des Constructions

Année académique : 2015-2016

Promoteur : Ph. Rigo

Ce travail porte sur l'identification des principaux paramètres influençant la résistance au choc des portes d'écluses. Ce travail vise donc à identifier, par analyse numérique et en complément des analyses analytiques réalisées précédemment, parmi toutes les variables d'entrées celles qui auront la plus grande influence sur la résistance au choc.

La première partie de ce travail consiste en une analyse numérique précise sur différents modèles de portes à géométrie fixe. Une étude de la variation de l'enfoncement maximum du bateau dans la porte ainsi que de la variation de l'effort pour une variation de l'épaisseur des éléments constitutifs m'a permis de tirer une première conclusion ; une augmentation de l'épaisseur des raidisseurs ainsi que des âmes des traverses a une influence non négligeable sur la résistance de la porte.

Ensuite, des pistes d'optimisation faisant varier la géométrie de la porte ont été proposées. L'idée est de réduire l'élanement des cadres ou de renforcer ces éléments afin de réduire le risque de formation de rotules plastiques et ainsi favoriser la transmission des efforts dans l'ensemble de la porte.

Les prémices de l'étude d'une de ces pistes ont été dressées. Cette optimisation consiste à ajouter une traverse en partie haute de la porte et ainsi à réduire l'élanement des cadres et donc le risque de formation de rotules plastiques. Lors d'un impact en partie supérieure, cet ajout de traverse a un effet bien plus prononcé sur la résistance de la porte.

A l'issue de ce travail, j'ai pu tirer deux conclusions concernant le renforcement des portes planes à simple bordé. La première, pour une géométrie de porte fixe, une augmentation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs apporte une résistance supplémentaire à la porte tout en diminuant l'effort maximum. La seconde, l'ajout d'une traverse, et donc l'uniformisation de l'entre-axes, combinée à une réduction des épaisseurs des traverses existantes afin de conserver un poids de la structure égal a un impact bien plus marqué sur la résistance de la porte soumise à un choc de bateau.

Abstract

Titre : Identification of the parameters influencing the resistance of the lock gates to impacts.

Realized by : Maurine Quoibion

Section : Master Civil Engineer

Academic year : 2015-2016

Promoter : Ph. Rigo

This work carries on the identification of the main parameters influencing the resistance of the lock gates to impacts. Thus, this work aims at identifying, by numerical analysis and in addition to the analytical analyses carried out previously, among all input variables those which will have the greatest influence on the impact resistance.

The first part of this work consists in an accurate numerical analysis on different models of gates with a fixed geometry. A study of the variation of the maximum driving of the ship in the gate and of the variation of the stress for a variation of the thickness of the components allowed me to draw a first conclusion ; an increase in the thickness of the stiffeners or of the web of the girders has a considerable influence on the resistance of the gate.

Then, some tracks of optimization varying the geometry of the gate have been proposed. The idea is to reduce the slenderness of the frames or to reinforce these frames in order to reduce the risk of formation of plastic hinges and thus to promote the transmission of the stresses across the gate.

The first steps of the study of one of these tracks have been drawn up. This optimization consists in adding a girder in high-partly of the gate and thus to reduce the slenderness of the frames and thus the risk of formation of plastic hinges. During an impact in high-partly, this addition of a girder has an effect much more marked on the resistance of the gate.

At the end of this work, I could draw two conclusions concerning the reinforcement of the plane gates. The first, for a fixed geometry of gate, an increase of the thickness of the stiffeners provides an additional resistance of the gate and a decreasing of the maximum stress. The second, the addition of a girder, et thus the standardization of the distances between these components, combined with a reduction of the thicknesses of the existing girders in order to preserve an equal weight of the structure has an impact much more pronounced on the resistance of the gate subjected to a collision of a boat.

Table des matières

1	Introduction	10
1.1	Contexte	10
1.2	Sujet du travail	11
1.3	Les portes étudiées	12
2	Etat de l'art	15
2.1	Etude analytique	15
2.1.1	Propriétés du modèle	15
2.1.2	Détermination analytique de la résistance	17
2.2	Optimisation des structures	31
3	Portes et modèles étudiés	32
3.1	Modélisation aux éléments finis de la Porte de 13m	33
3.1.1	Modèle Patran	33
3.1.2	Définition de l'impacteur	38
3.1.3	Paramètres LS-Dyna	41
3.2	Porte 26m	42
3.2.1	Géométrie	42
3.2.2	Vérification avec LBR-5	43
3.3	Définition des modèles	48
4	Étude des résultats	50
4.1	Enfoncement du bateau dans la porte	50
4.1.1	Enfoncement du bateau lors d'un impact sur la partie haute de la porte	50
4.2	Enfoncement du bateau lors d'un impact sur la partie basse de la porte	61
4.3	Comparaison des déformations	64
4.4	Comparaison des efforts dans la porte	69
4.4.1	Impact entre les cadres et les traverses	69
4.4.2	Impact sur une traverse	74
4.5	Résultats	78
4.5.1	Enfoncement	78
4.5.2	Effort	78
5	Analyse critique des résultats	79
5.1	Contraintes de Von Mises	79
5.2	L'énergie de Hourglass	82
5.3	Energie interne	84

6	Piste d'optimisation	88
6.1	Piste étudiée : Ajout d'une traverse	88
6.1.1	Impact entre les cadres et les traverses en partie haute de la porte .	89
6.1.2	Impact sur une traverse en partie haute de la porte	94
6.1.3	Impact sur une traverse en partie basse de la porte	96
6.1.4	Résultats	100
7	Conclusions générales	101
8	Recommandations	103

Table des figures

1.1	Exemple d'accident - Canal de Kiel (Allemagne)	10
1.2	Définitions des données d'entrée	12
1.3	Porte glissante de la 3e écluse de Lanaye	13
1.4	Porte levante de l'écluse de Réchicourt-le-Château	14
2.1	Propriétés géométriques de la porte et du navire	16
2.2	Lois constitutives pour la méthode simplifiée	17
2.3	Séquence de déformation	18
2.4	Les trois types de super-éléments	19
2.5	Schéma de déformation pour un super-élément de type 1	20
2.6	Schéma de déformation pour un super-élément de type 2	22
2.7	Schéma de déformation pour un super-élément de type 3	23
2.8	Modèle des poutres et champ déplacement correspondant pour la détermination de la résistance élastique	24
2.9	Résistance au cisaillement de la poutre impactée	27
2.10	Caractéristiques du mode global	29
2.11	Contribution individuelle de la poutre i	30
3.1	Vues en plan et en élévation - Porte de 13m	35
3.2	Modélisation Porte de 13m	37
3.3	Conditions d'appuis	38
3.4	Définition de l'impacteur	39
3.5	Impact agissant entre les cadres et les traverses sur la partie haute de la porte	40
3.6	Déformation de la porte	41
3.7	Pression hydrostatique	44
3.8	Résultats LBR-5	45
3.9	Vues en plan et en élévation - porte de 26m	46
3.10	Déformée de la porte de 26m	47
3.11	Contraintes dans la porte de 26m	47
4.1	Enfoncement maximum du bateau pour le modèle de référence	50
4.2	Enfoncement maximum du bateau pour un choc entre les cadres et les traverses	53
4.3	Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur une traverse	54
4.4	Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur un cadre	55
4.5	Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur l'intersection d'un cadre et d'une traverse	56
4.6	Enfoncement maximum du bateau pour un choc entre les cadres et la traverses - Porte de 26m	58
4.7	Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur une traverse - Porte de 26m	59

4.8	Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur un cadre- Porte de 26m	60
4.9	Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur une traverse inférieure	62
4.10	Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur un cadre inférieur . . .	63
4.11	Déformations	64
4.12	Contraintes de Von Mises	65
4.13	Contraintes de Von Mises dans les traverses	67
4.14	Contraintes de Von Mises	68
4.15	Comparaison des vitesses	69
4.16	Efforts transmis par le bateau pour un impact entre les cadres et les traverses	70
4.17	Évolution de l'effort pour un impact agissant entre les cadres et les traverses	72
4.18	Évolution de l'effort pour un impact agissant entre les cadres et les traverses avec augmentation de l'épaisseur des âmes des traverses	73
4.19	Efforts en fonction du poids pour un impact agissant entre les cadres et les traverses avec augmentation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs . . .	73
4.20	Évolution de l'effort pour un impact agissant sur une traverse	75
4.21	Évolution de l'effort pour un impact agissant sur une traverse avec augmen- tation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs	76
4.22	Efforts en fonction du poids pour un impact agissant sur une traverse avec augmentation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs	76
4.23	Évolution de l'effort pour un impact agissant sur une traverse avec augmen- tation de l'épaisseur des semelles des cadres	77
4.24	Efforts en fonction du poids pour un impact agissant sur une traverse avec augmentation de l'épaisseur des âmes des cadres	77
5.1	Contraintes de Von Mises	80
5.2	Déformations et contraintes dans les cadres	81
5.3	Rotule plastique	81
5.4	Pourcentage d'énergie de Houghlass dans le modèle de Th. Gernay pour un impact sur une traverse.	82
5.5	Energie de Houghlass lors d'une modification des semelles des traverses pour un impact sur traverse	83
5.6	Variation de l'énergie interne - Choc entre une traverse et un cadre avec modification de l'épaisseur des semelles des traverses - Porte 13m	86
5.7	Variation de l'énergie interne - Choc sur une traverse supérieure avec mo- dification de l'épaisseur des semelles des traverses - Porte 13m	87
6.1	Déformations et contraintes - Porte 3 - Impact entre les cadres et les tra- verses en partie supérieure	90
6.2	Déformations et contraintes dans les traverses - Porte 3 - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute	91
6.3	Déformations et contraintes dans les raidisseurs - Porte 3 - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute	92
6.4	Influence d'une traverse supplémentaire sur l'enfoncement - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute	93
6.5	Comparaison de l'effort repris par la porte lors d'un impact entre les cadres et les traverses	94
6.6	Influence d'une traverse supplémentaire sur l'enfoncement - Impact sur une traverse en partie haute	95
6.7	Comparaison de l'effort repris par la porte lors d'un impact sur une traverse supérieure	96

6.8	Déformations et contraintes de la Porte 3 - Impact sur une traverse en partie basse	97
6.9	Déformations et contraintes dans les raidisseurs - Porte 3 - Impact sur une traverse en partie basse	98
6.10	Influence d'une traverse supplémentaire sur l'enfoncement - Impact sur une traverse en partie basse de la porte	99
6.11	Comparaison de l'effort repris par la porte lors d'un impact sur une traverse inférieure	100

Liste des tableaux

3.1	Dimensions des traverses - porte de 13m	33
3.2	Dimensions des traverses - Porte de 13m	34
3.3	Dimensions des raidisseurs - Porte de 13m	35
3.4	Dimensions des traverses - Porte 13m	40
3.5	Dimensions des traverses - Porte de 26m	42
3.6	Dimensions des traverses - Porte de 26m	43
3.7	Dimensions des raidisseurs - Porte de 26m	43
3.8	Restrictions structurelles	44
3.9	Résultats LBR-5 - porte de 26m	45
3.10	Définition des différents modèles	49
3.11	Définition des différents modèles	49
4.1	Moyenne de l'effort - Augmentation de l'épaisseur des âmes des traverses . .	70
4.2	Moyenne de l'effort - Augmentation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs	71
4.3	Définition des différents modèles	74
5.1	Variation de l'énergie de Hourglass	83
5.2	Variation de l'énergie interne	85
6.1	Variation de l'enfoncement - Porte 3 - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute	92
6.2	Efforts moyens pour un impact entre les cadres et les traverses	94
6.3	Variation de l'enfoncement - Porte 3 - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute	95
6.4	Efforts moyens pour un impact entre les cadres et les traverses	96
6.5	Efforts moyens pour un impact entre les cadres et les traverses	99

Chapitre 1

Introduction

Dans cette première partie est reprise l'énoncé de ce Travail de Fin d'Etudes proposé par le service Anast et dont Monsieur Rigo en est le promoteur.

1.1 Contexte

Tout au long de sa durée de vie, une porte d'écluse peut être soumise à des impacts provoqués par des navires qui bien souvent arrivent trop rapidement et sont incapables de freiner avant d'atteindre la structure. Dans la plupart des cas, ces collisions causent des dommages limités, mais des dégâts de plus grande ampleur sont parfois à redouter. En outre, en raison du développement du transport fluvial, le chargement et les dimensions des navires ont tendance à augmenter, ce qui accroît d'autant les risques liés aux impacts. Il s'avère donc de plus en plus nécessaire d'étudier prudemment la résistance aux chocs des portes d'écluses.

Un exemple de ce type d'accident est celui survenu sur le canal de Kiel en Allemagne. Un navire de 131 mètres de long, victime d'une avarie de propulsion n'a pas pu éviter l'impact avec la porte d'écluse. Les dégâts occasionnés sont importants comme le prouve la photo ci-dessous.



FIGURE 1.1 – Exemple d'accident - Canal de Kiel (Allemagne)

1.2 Sujet du travail

Afin d'estimer correctement les conséquences d'une collision de bateau sur une porte d'écluse donnée, une des approches les plus efficace est d'effectuer une analyse numérique non linéaire. Celle-ci permet d'obtenir des résultats précis et de réaliser un raffinement de l'étude. Cependant, cette approche nécessite de construire des modèles aux éléments-finis pour chaque navire et chaque porte, pour lesquels le maillage doit être suffisamment raffiné pour cibler le mécanisme de déformation apparaissant durant la collision. Pour ces raisons, les simulations numériques demandent souvent beaucoup de temps, principalement lorsque différents scénarios d'impact doivent être étudiés afin de déterminer le plus critique. De plus, réaliser la modélisation réaliste du processus complet de collision nécessite souvent des moyens de calcul énorme. Parfois, une telle approche n'est pas justifiée, en particulier au début de la phase de conception, lorsque la structure finale de la porte n'est pas complètement fixée.

Pour ces raisons, une méthode analytique dite méthode des super-éléments a été déterminée afin d'évaluer les conséquences de collisions sur les portes d'écluse. Bien sûr, cette approche reste approximative, le but n'est donc pas de remplacer les analyses aux éléments finis, mais de construire un outil complémentaire qui peut être utilisé durant l'étape de pré-dimensionnement, lorsqu'un processus itératif est nécessaire afin d'opter pour la configuration optimale de porte. Durant l'étape finale de conception, une approche numérique peut aussi être utilisée afin de déterminer les scénarios d'impact engendrant le plus de dommages.

Dans cette optique, ANAST a développé des méthodes de calcul simplifiées qui permettent d'évaluer approximativement la résistance à l'impact. Les outils mis au point permettent actuellement de traiter des portes planes à simple bordé et des portes busquées. Ils fonctionnent selon le schéma 1.2.

L'objet de ce travail de fin d'études est d'identifier, par une analyse numérique, parmi toutes les variables d'entrées, celles qui auront la plus grande influence sur la résistance au choc.

Ce travail s'emploie donc, pour une géométrie de porte donnée et combiné aux modèles analytiques définis précédemment, à déterminer, par analyses numériques, les paramètres à modifier pour augmenter la résistance de la porte sans que le coût ou le poids de la structure ne deviennent trop important. Les résultats obtenus pourront alors être implémentés dans un logiciel d'optimisation afin de guider les éléments à modifier en priorité.

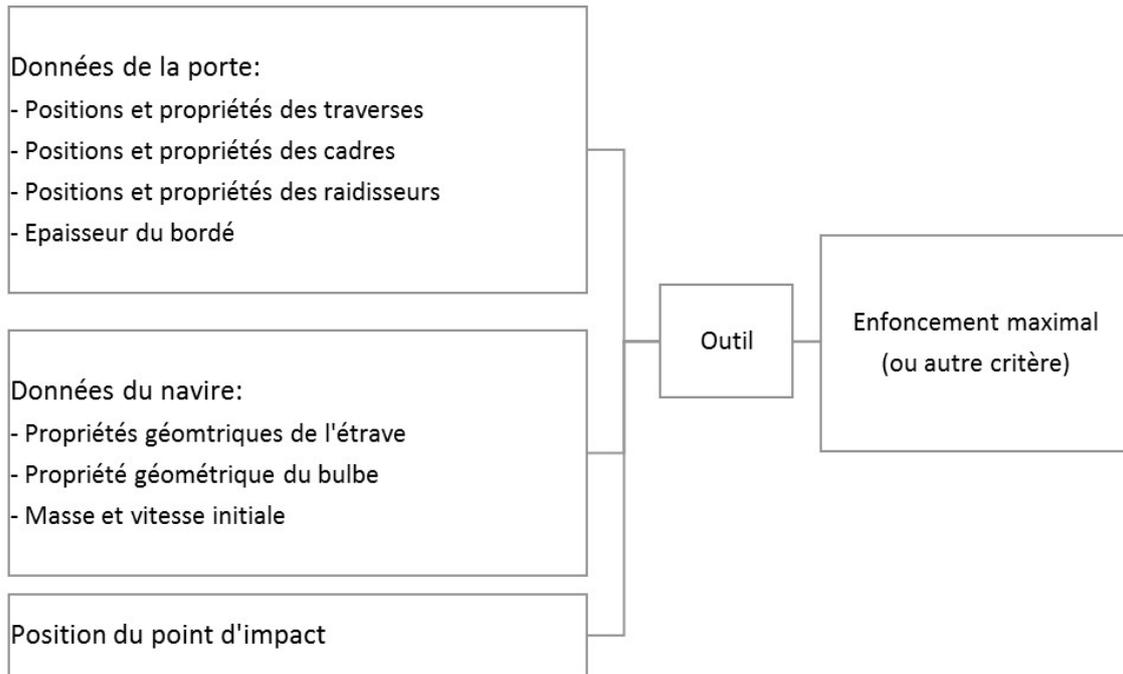


FIGURE 1.2 – Définitions des données d'entrée

1.3 Les portes étudiées

Les portes traitées dans l'ensemble de ce travail sont des portes composées d'une tôle d'acier appelée le bordé et renforcée par des profilés en T orthogonaux de trois types :

- Les éléments de renforcement verticaux sont appelés les cadres. Ces éléments transmettent les sollicitations provenant du bordé aux profilés horizontaux, les traverses. Ils sont disposés à intervalles réguliers sur la largeur de la porte.
- Les éléments de renforcement horizontaux sont appelés les traverses. Ces éléments sont assimilés à des poutres bi-appuyées sur les montants de la porte et reprennent les efforts transmis par les cadres. En général, elles ne sont pas disposées régulièrement sur la hauteur de la porte. En effet, celles-ci sont réparties afin que chacune soit sollicitée en flexion par la même pression hydrostatique. Leur espacement décroît donc de haut en bas.
- En plus de ce système, de petits profilés sont disposés horizontalement entre les traverses afin de renforcer le bordé. Leur rôle est principalement d'éviter le flambement et les grandes déformations qui pourraient survenir dans la porte.

Ces structures sont donc des portes planes franchissant en une seule volée la largeur de l'écluse. Il s'agit de portes levantes ou à déplacement latéral.

Des exemples de ces portes vont être listés dans la suite.

Un premier exemple est la porte aval de la 3^e écluse de Lanaye. Cette porte est une porte de type roulante avec chariot de manoeuvre. Ces portes se déplacent donc perpendiculairement à l'axe de l'écluse et se retirent dans une chambre pour laisser le passage aux bateaux. Une photo du système est reprise à la figure 1.3.



FIGURE 1.3 – Porte glissante de la 3e écluse de Lanaye

Un second exemple représenté dans ce rapport est la porte aval de l'écluse de Réchicourt-le-Château en Lorraine (France). Cette porte est de type levante c'est-à-dire qu'elle est soulevée verticalement au-dessus de la tête de l'écluse pour permettre le passage des bateaux. Sur la figure 1.4, les éléments de raidissages de la porte sont particulièrement visibles.



FIGURE 1.4 – Porte levante de l'écluse de Réchicourt-le-Château

Chapitre 2

Etat de l'art

Dans cette seconde section, les bases du travail de L. BULDGEN, H. LE SOURNE, Ph.. RIGO dans '*A simplified analytical method to estimate the resistance of plane lock gates impacted by river barges*. 2015, vont être reprises [4].

Cet article présente une méthode analytique simplifiée pour évaluer la résistance d'une porte d'écluse à simple bordé soumise à un impact de navire.

2.1 Etude analytique

2.1.1 Propriétés du modèle

Pour commencer, il est nécessaire de définir les données du modèle simplifié (Figure 1.2). Les propriétés géométriques caractérisant la porte impactée, le bateau provoquant l'impact ainsi que le scénario de collision sont considérés.

La porte est modélisée comme une plaque de hauteur h et de largeur l appelée le bordé. Celle-ci est renforcée par des traverses horizontales et des cadres verticaux placés respectivement aux positions discrètes Y_i et X_i selon l'axe verticale et l'axe horizontal (Figure 2.1). De petits raidisseurs horizontaux peuvent aussi être ajoutés, principalement pour prévenir du flambement qui pourrait apparaître dans la plaque. Chaque élément présente une section transversale en forme de T caractérisée par les dimensions géométriques t_w, h_w, t_f et h_f . L'épaisseur de la plaque est dénotée par t_p .

La forme du navire est décrite par les paramètres définis à la figure 2.1. La hauteur et la largeur totales du bateau sont notées respectivement h_b et B_X alors que B_Y et B_Z sont les dimensions de la proue en contact avec la porte. L'angle de l'étrave du bateau est noté ϕ , la masse totale du bateau M_b et sa vitesse V_b .

La position relative entre le navire et la porte est définie par le point (X_I, Y_I) au point d'impact I qui est placé dans un plan vertical symétrique au bateau (Figure 2.1).

Concernant les conditions limites, la porte est supposée simplement appuyée sur les murs de l'écluse. Cela signifie que les déplacements longitudinaux selon l'axe Z sont contraints en $X = 0$ et $X = l$. Cependant, il est important de mentionner qu'une condition de libre glissement est imposée simultanément à ces endroits. Il n'y a donc pas de contraintes concernant le déplacement latéral selon l'axe X. En plus des appuis engen-

drés par les murs de l'écluse, la porte peut aussi être en contact avec un rebord sur le sol. Dans ce cas particulier, les déplacements selon l'axe Z sont également contraints en $Y = 0$.

Dans ce modèle simplifié, la loi constitutive de l'acier est caractérisée par une première phase élastique, suivie par un comportement parfaitement plastique lorsque la contrainte σ_0 est atteinte (Figure 2.2). Une telle hypothèse implique que le comportement non-linéaire dû à un accroissement de contraintes n'est pas pris en compte conservativement. Les effets de taux de contraintes sont également négligés.

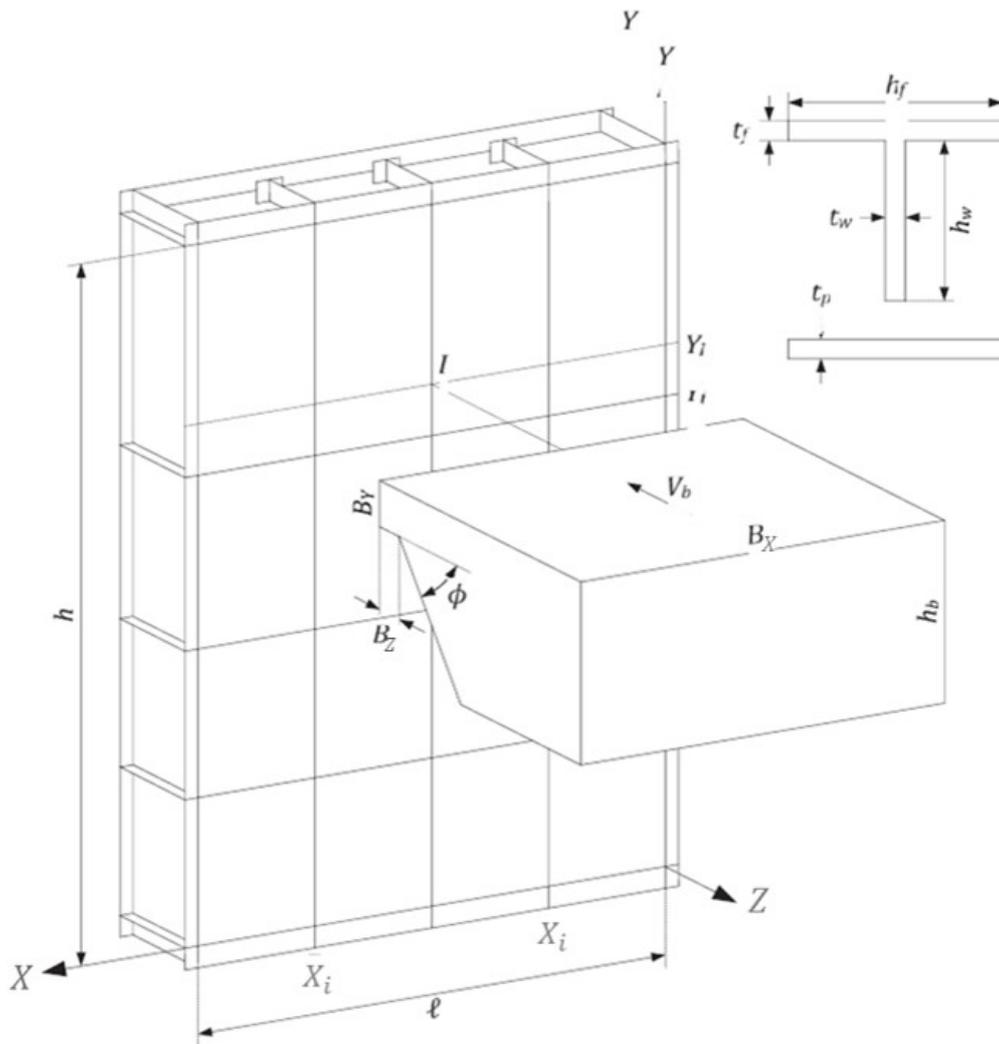


FIGURE 2.1 – Propriétés géométriques de la porte et du navire

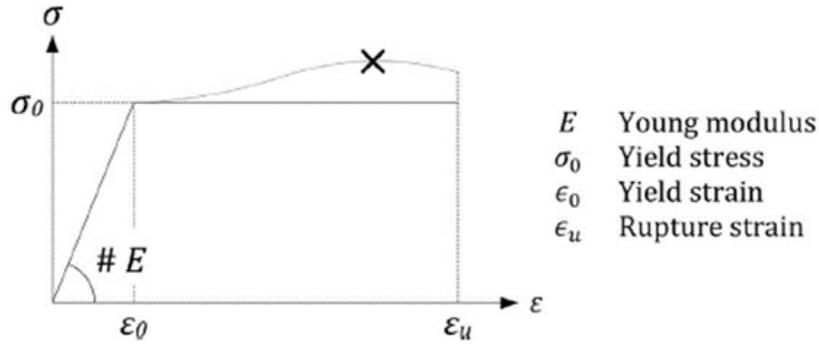


FIGURE 2.2 – Lois constitutives pour la méthode simplifiée

2.1.2 Détermination analytique de la résistance

Une fois les données géométriques collectées, l'étape suivante consiste à évaluer l'intensité de la collision (Figure 1.2). Le processus de déformation est supposé être divisé en deux phases successives.

Processus de déformation

Au début de la collision, la déformation de la porte consiste principalement en une compression locale plastique des composants structurels proches de l'aire de contact ainsi que d'un petit déplacement total de la porte. A la Figure 2.3a et d, le mouvement élastique $u(X, Y)$ agissant simultanément avec la déformation des cadres verticaux et des poutres horizontales engendrée par l'impact du bateau peut être observé. Cette première phase est appelée mode local et est caractérisée par une résistance locale P_L . Afin d'évaluer P_L pour une pénétration donnée δ , il est nécessaire de déterminer :

- La résistance à la compression P_c associée aux composants structurels directement impactés par le bateau
- La résistance élastique P_e associée au champ de petits déplacements $u(X, Y)$ imposé par le bateau à la porte entière

Une fois que ces deux contributions sont calculées, la résistance locale P_L est prise conservativement comme le minimum entre celles-ci

$$P_L = \min\{P_c; P_e\} \quad (2.1)$$

Le processus de déformation mentionné ci-dessus se produit uniquement au début de la collision. Lorsque la pénétration augmente, un mécanisme de déformation global est observé sur la porte entière. A ce moment, on suppose que le processus de compression locale s'arrête et donc la porte est uniquement soumise à un champ de déplacement global $u(X, Y)$ décrivant le comportement plastique (Figure 2.3b et e). Cette seconde phase est appelée mode global et est caractérisée par une résistance globale P_G .

Dans l'approche simplifiée, la transition entre les phases locales et globales est supposée se produire brusquement, ce qui signifie que les modes locaux et globaux sont découplés. Bien sûr, cette hypothèse est discutable car les simulations Eléments Finis montrent que les compressions locales modérées se produisent encore lors du mode global. D'un point

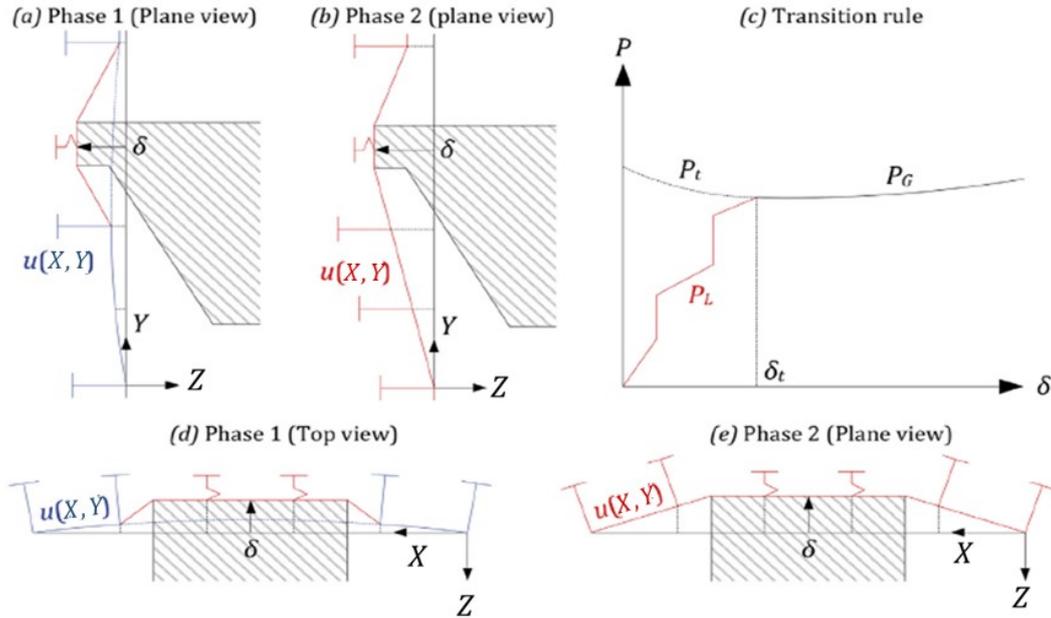


FIGURE 2.3 – Séquence de déformation

de vue pratique, l'hypothèse précédente peut être acceptée si le mode global est considéré plus dominant pour des grandes valeurs de pénétration. La transition est alors supposée se produire lorsque P_G atteint la valeur seuil P_L qui suffit à initier le comportement plastique de la porte entière.

Toutes les considérations précédentes peuvent être résumées par les formules suivantes donnant la résistance P de la porte (Figure 2.3c) :

$$\begin{aligned}
 \text{Si } \delta \leq \delta_t, \quad P &= P_L = \min\{P_c; P_e\} \quad \rightarrow \quad \text{Mode local} \\
 \text{Si } \delta > \delta_t, \quad P &= P_G \quad \rightarrow \quad \text{Mode global}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Où δ_t représente la pénétration correspondant à la transition ($P_L = P_t$). Lorsque le processus de déformation est entièrement décrit, les termes P_c , P_e , P_t et P_G donnant la résistance de la porte durant les phases successives peuvent être évalués.

Processus de la résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression est basée sur la méthode des super-éléments. Cette approche a été introduite par Lützen et al. [12] pour prédire rapidement les dommages occasionnés par une collision entre deux bateaux. Lützen a décomposé le navire heurté en larges entités structurales appelées super-éléments. Chacun de ces éléments est associé à une expression de forme donnant sa résistance de collision comme une fonction de la pénétration. La force d'impact totale est alors obtenue en sommant toutes les contributions des différents éléments. Cette méthode a été adaptée à une porte d'écluse plane en introduisant les trois types de super-éléments différents suivants (Figure 2.4a) :

- Les super-éléments de type 1 sont utilisés pour les éléments plans soumis à un impact hors-plan (Figure 2.4b). Ils sont délimités par deux poutres horizontales et deux cadres verticaux successifs, qui sont supposés être simplement appuyés.

- Les super-éléments de type 2 représentent les portions de poutres bordées par deux cadres, ou vice-versa (Figure 2.4c). Ils peuvent être horizontaux ou verticaux et sont soumis à un impact plan.
- Les super-éléments de type 3 correspondent aux intersections entre les poutres et les cadres (Figure 2.4d). Ils peuvent avoir une section en forme de X et de T .

Afin d'évaluer P_c , la porte est divisée en N_e super-éléments, chacun appartenant à une des catégories décrites ci-dessus et ayant sa propre résistance $P_{c,i}$. Par conséquent, la résistance peut être obtenue par :

$$P_c = \sum_{i=1}^{N_e} P_{c,i}(\delta) \quad (2.3)$$

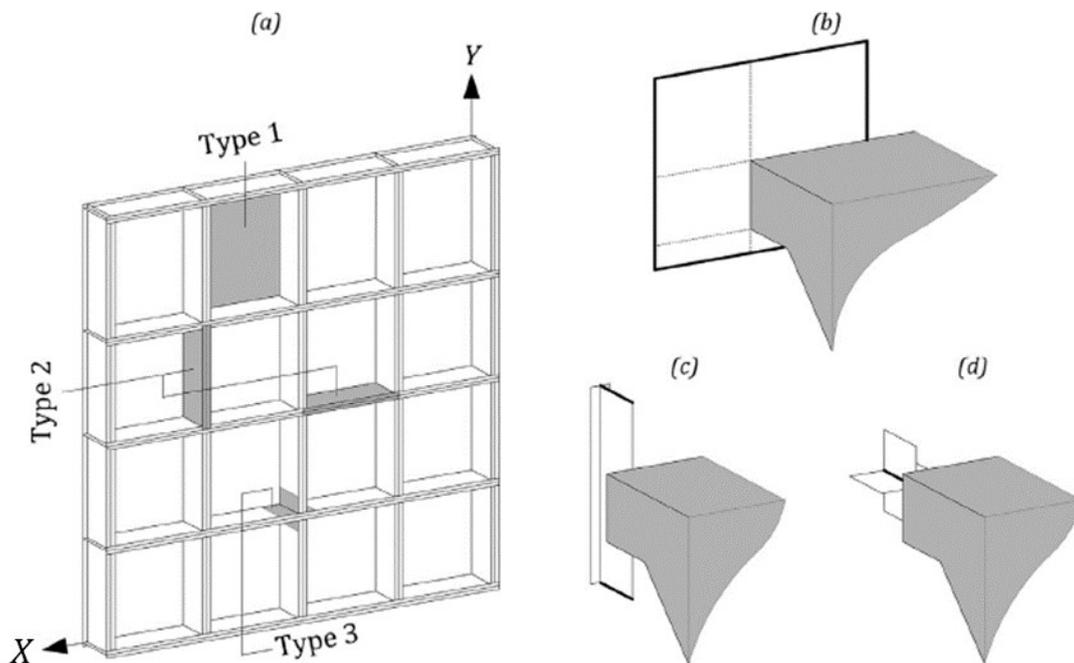


FIGURE 2.4 – Les trois types de super-éléments

Par cette équation, on suppose qu'il n'y a pas d'interactions entre les super-éléments, c'est-à-dire qu'ils se déforment indépendamment les uns des autres et sont activés seulement par un contact géométrique avec le bateau. A partir de cette hypothèse, les formules pour obtenir $P_{c,i}$ peuvent être dérivées pour les trois types de super-éléments en considérant seulement les conditions limites représentées à la Figure 2.4.

La résistance à la compression de chaque super-éléments P_c est déterminée analytiquement en appliquant le théorème de la limite supérieure de Jones [10]. Cette approche consiste à supposer un mécanisme de déformation cinématiquement admissible pour une structure et à évaluer le taux d'énergie interne correspondant E_{int} avec la puissance dissipée par la force d'impact \dot{W} . Afin d'approximer correctement la force de compression, le principal défi est alors de choisir le modèle de déformation le plus proche de la réalité.

Super éléments de type 1

Considérons d'abord la résistance à la compression conférée par la plaque. Durant l'impact, l'aire localisée entre les deux poutres horizontales et les deux cadres verticaux touchée par le bateau est supposée se déformer selon le modèle de déformation décrit à la Figure 2.5. La contribution à la résistance en compression $P_{c,p}$ des super-éléments de type 1 activés lors de la collision est donnée par :

$$P_{c,p} = \sigma_0 \cdot \delta \cdot \left(\frac{m^2}{(2n+1)(2m-1)} \cdot \frac{a}{b_1} \cdot t_p + \frac{n^2}{(2m+1)(2n-1)} \cdot b_1 a \cdot \bar{t}_p \right) \quad (2.4)$$

Où σ_0 est l'écoulement de contrainte et \bar{t}_p est une valeur augmentée de l'épaisseur de la plaque obtenue par une répartition des petits éléments horizontaux sur le dessus de la porte. Les deux paramètres m et n peuvent être choisis arbitrairement pour estimer plus correctement le champ de déplacement réel. En général, une solution linéaire avec $m = n = 1$ est satisfaisante. Cette solution est semblable à celle proposée par Zhang [19].

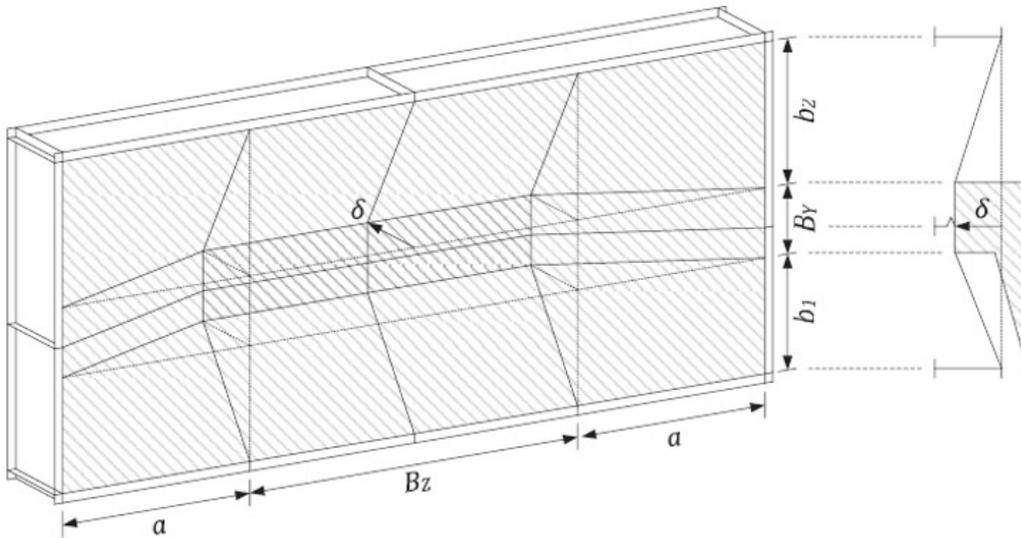


FIGURE 2.5 – Schéma de déformation pour un super-élément de type 1

Super éléments de type 2

Pour le second type de super-éléments, la procédure classique pour évaluer analytiquement leur résistance est de supposer que leur section transversale en forme de T (Figure 2.1) subit un processus de déformation. Cette procédure a déjà été traitée dans la littérature par divers auteurs comme Simonsen [16], Wierzbicki et Culbertson-Driscoll [17], Zhang [19] ou Simonsen et Ocakli [15]. De plus, une revue très détaillée des solutions qui existent a aussi été publiée par Hong et Amdhal [8]. Bien que ce sujet soit très documenté, la situation dans ce cas est quelque peu plus compliquée, puisqu'il y a deux configurations possibles.

En effet, considérant par exemple une section de poutre horizontale, la position relative du navire peut être telle qu'une extrémité seulement du super-élément soit impactée

par le navire. Dans ce cas, les deux parties différentes numérotées 1 et 2 sur la figure 2.6 doivent être étudiées séparément. Dans la région 1, le processus de déformation implique la rotation de deux triangles ABC et ACD autour de cinq rotules plastiques AB, AC, CD, BC et AD, qui dissipent de l'énergie par les déformations de flexion.

De plus, afin de garantir la compatibilité à la jonction avec la partie restante de la poutre, ces deux triangles doivent aussi subir une élongation axiale de telle sorte qu'il n'y ait pas de discontinuité aux bords BC et CD. Par conséquent, de l'énergie est aussi dissipée par la déformation de la membrane. Dans la région 2, pour une pénétration donnée δ , les deux rectangles BCEF et CDFG tourne autour de trois rotules plastiques BE, CF, et DG, donc de la dissipation se fait par flexion de la section.

Cependant, les dimensions du navire sont généralement plus large que les distances entre deux poutres horizontales ou deux cadres verticaux successifs. Par conséquent, une autre configuration est aussi possible, dans laquelle chacune des extrémités du super-élément sont impactées simultanément. Dans ce cas, les déplacements des points A et E sont les mêmes et A coïncide avec B, de telle sorte que la première région n'existe plus ($a = 0$). Dans cette situation, l'énergie est dissipée uniquement par la rotation rigide de deux rectangles BCEF et CDFG autour des rotules plastiques BE, CF et DG.

Les résistances d'impact individuelles pour les deux configurations décrites ci-dessus ont déjà été déterminées par L. Buldgen [3] et sont données par les équations 2.5 et 2.6 :

Si une seule extrémité est impactée :

$$P_{c,i} = \frac{\sigma_0 t_w^2 \cdot (a_1 + a_2) \cdot \pi}{4H} + \frac{\sigma_0 \cdot t_w \cdot H}{a_1} \cdot (\delta + 2H) \quad (2.5)$$

Si les deux extrémités sont impactées :

$$P_{c,i} = \frac{\sigma_0 t_w^2 \cdot a_2 \cdot \pi}{4H} \quad (2.6)$$

Où t_w désigne l'épaisseur de l'âme des raidisseurs horizontaux, comme mentionné à la figure 2.1 et H désigne la hauteur de déformation. Cette dernière doit encore être déterminée. Comme suggéré par Simonsen et Ocakli [15], H peut être estimée en minimisant la force moyenne de compression sur un pli, c'est-à-dire :

$$\frac{\partial}{\partial H} \left(\int_0^{2H} P_{c,i}(\delta) d\delta \right) = 0 \quad \iff \quad H = \sqrt[3]{\frac{\pi}{12} \cdot t_w \cdot a_1 \cdot (a_1 + a_2)} \quad (2.7)$$

Où l'expression (2.5) a été utilisée pour $P_{c,i}$. Naturellement, lorsque $\delta = 2H$, le pli est complètement fermé et l'équation (2.5) et (2.6) n'est plus valable. Dans ce cas, comme suggéré par Zhang [19], il peut être considéré que le schéma de déformation de la figure 2.6 est immédiatement répété quand $\delta = 2H$, ce qui signifie qu'un nouveau pli s'est formé. Cette procédure est valable aussi longtemps que l'âme des raidisseurs horizontaux h_w n'a pas été entièrement comprimée.

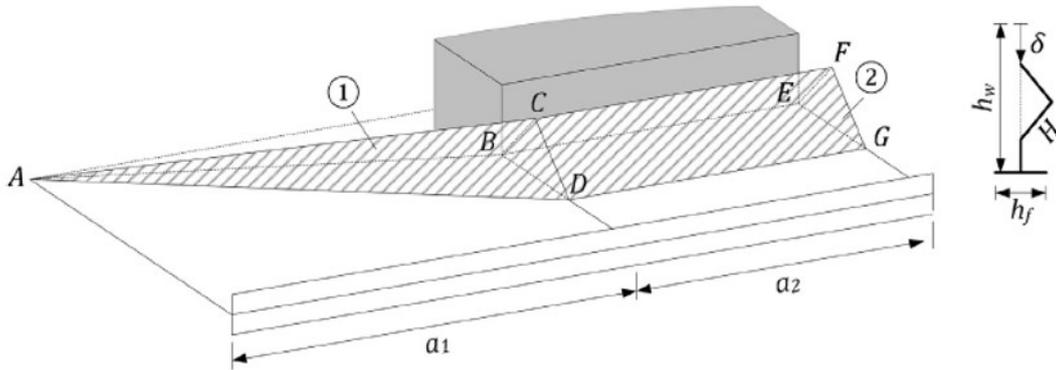


FIGURE 2.6 – Schéma de déformation pour un super-élément de type 2

Super éléments de type 3

A partir des schémas de déformation présentés à la Figure 2.6, il apparaît que la compatibilité n'est pas nécessairement respectée le long des bords EF et FG à cause de la connexion entre les super-éléments et un cadre vertical. Par conséquent, comme représenté à la figure 2.7a, un élément de transition a été considéré afin de prendre correctement la compression axiale des intersections et de garantir la cohérence entre tous les mécanismes considérés. C'est précisément le but des super-éléments de type 3.

Le schéma de déformation décrit à la figure 2.7b est supposé évaluer la résistance à la compression des intersections. Durant l'impact, ce super-élément est soumis à un raccourcissement axial δ , ce qui implique la rotation de huit triangles comme montré à la figure 2.7b. Dans ce processus, la hauteur pliée H peut encore être calculée en utilisant l'équation (2.7) car elle est influencée par la déformation d'autres super-éléments connectés, alors que la longueur est supposée être proportionnelle à H.

Le mouvement imposé des triangles implique une dissipation par flexion à cause des rotations autour des rotules plastiques, mais les effets de la membrane à cause de l'allongement axial nécessitent de garantir la compatibilité le long des côtés EF et FG (figure 2.7a). Le taux d'énergie résultant a été évalué par Amdahl [1], qui a trouvé que la résistance des intersections de section X peut être calculée par :

$$P_{c,i} = \frac{4 \cdot \sigma_0 t_w \cdot H}{\sqrt{3}} + \left(\sqrt{k^2 + \frac{1}{4}} \cdot \arcsin \frac{1}{\sqrt{4k^2 + 1}} + k \right) \quad (2.8)$$

Où k est une constante égale à 0,5733. Dans cette équation, il est important de mentionner que la hauteur pliée H est supposée être la même pour le réseau vertical et horizontal, ce qui n'est pas nécessairement vrai puisque les propriétés mécaniques et géométriques peuvent être différentes. Dans ce cas, la formule peut facilement être adaptée pour tenir compte de ces différences. De plus, d'autres expressions ont également été évaluées par Yamada et Pedersen [18] afin de considérer des mécanismes de déformations non-symétriques.

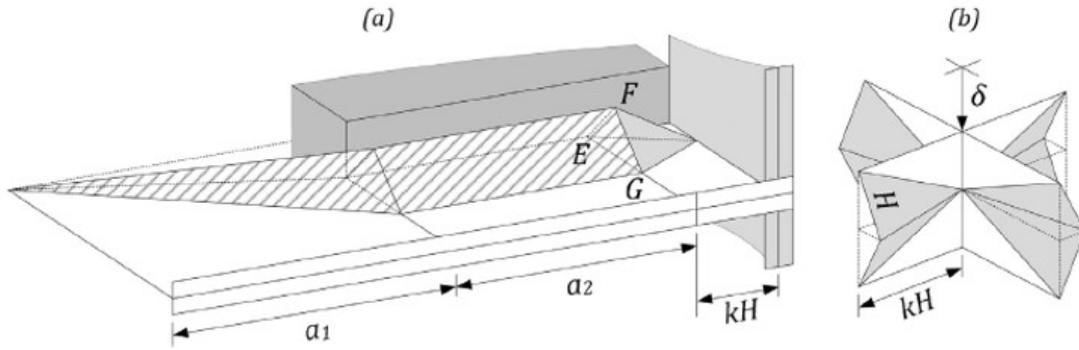


FIGURE 2.7 – Schéma de déformation pour un super-élément de type 3

Résistance totale à la compression

Finalement, la force totale de compression P_c développée durant le mode de déformation local peut être calculé en sommant :

- La résistance $P_{c,p}$ venant des éléments plans, calculés selon l'équation (2.4) qui exprime déjà tous les super-éléments de type 1 activés ;
- La résistance des poutres horizontales et des cadres verticaux. Celle-ci peut être trouvée en additionnant la contribution individuelle $P_{c,i}$ de tous les super-éléments de types 2 activés.
- La résistance des intersections entre les poutres et les cadres, obtenus en sommant les contributions individuelles $P_{c,i}$ de tous les super-éléments de type 3 activés.

Où $P_{c,i}$ est calculée avec l'aide des équations (2.5) et (2.6) ou (2.8). Une fois la résistance à la compression P_c calculée, l'étape suivante est de déterminer la solution élastique P_e

Détermination de la résistance élastique

Pour obtenir sa résistance élastique globale, la porte est modélisée comme un ensemble de poutres horizontales (Figure 2.8a). Chacune d'elle a une section transversale qui est ancrée à une partie collaborante de la plaque. Les longueurs et épaisseurs équivalentes de ces portions additionnelles sont notées respectivement h_{eq} et t_{eq} . Elles sont calculées selon les recommandations de l'EN 1993-1-5 pour tenir compte des effets de cisaillement, mais aussi pour le flambement local et global des plaques et des petits raidisseurs qui sont soumis à des forces de compression durant l'impact.

Dans le modèle mécanique équivalent illustré à la figure 2.8a, la poutre est simplement appuyée aux murs de l'écluse, sans aucune contrainte intermédiaire, ce qui implique que les cadres doivent être plus faibles que les poutres. Selon cette hypothèse ; le seul rôle des cadres est d'obliger les poutres horizontales à se déplacer à l'unisson, mais ils ne contribuent pas significativement à dissiper de l'énergie par la déformation élastique de la porte.

La détermination de la résistance P_e nécessite de définir un champ de déplacement $u(X, Y)$ hors-plan caractérisant la déformation élastique de toute la structure (figure 2.3a et d) durant le mode local. Dans un plan horizontal localisé à un niveau donné Y , il peut être observé à la figure 2.8b qu'un champ de déplacement $u_0(Y)$ est appliqué aux deux points A et B. Ces derniers sont séparés par une distance $d_0(Y)$ variant avec la

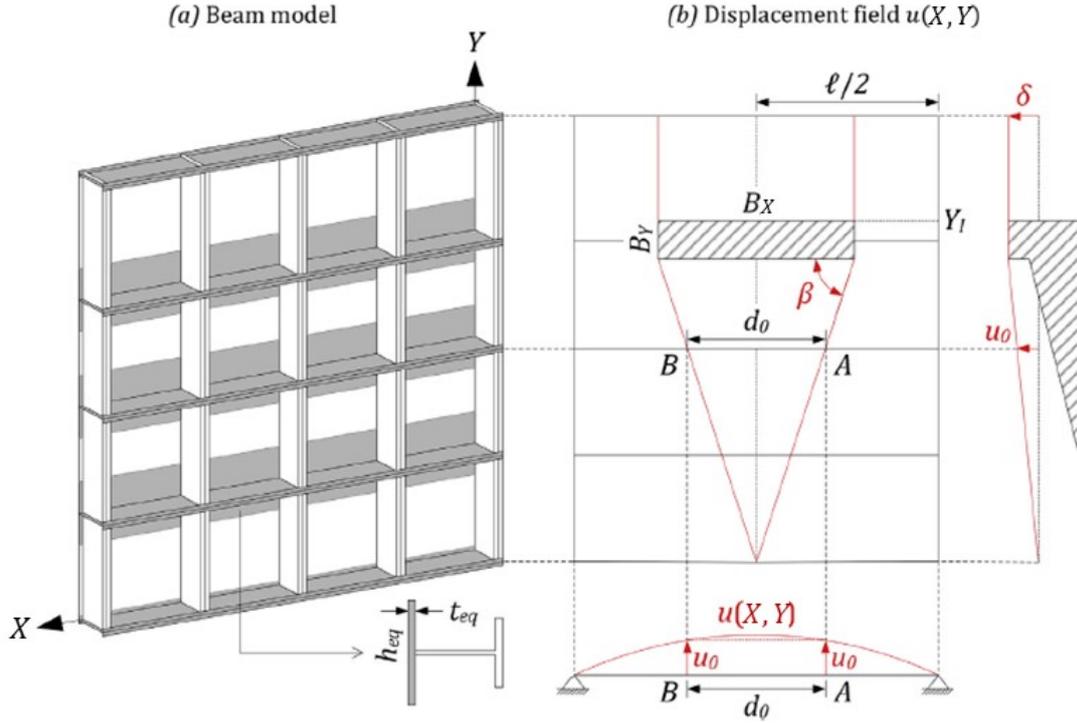


FIGURE 2.8 – Modèle des poutres et champ déplacement correspondant pour la détermination de la résistance élastique

proximité de l'aire de contact. Dans les régions sans ou au-dessus de l'impact (c'est-à-dire pour $Y \geq Y_I - B_Y$), il est supposé que $d_0(Y) = B_X$ et $u_0(Y) = \delta$, ce qui signifie que le déplacement doit être égal à la pénétration du navire. Cependant, pour les parties restantes de la porte (c'est-à-dire pour $Y < Y_I - B_Y$), l'influence $d_0(Y)$ du bateau est supposé diminuer progressivement avec une diffusion d'angle égal à β (figure 2.8b) de sorte que $d_0(Y) = 0$ au pied de la porte. Les hypothèses précédentes peuvent être écrites comme :

$$\begin{aligned}
 \text{Si } Y < Y_I - B_Y : \quad & u_0(Y) = \delta & d_0(Y) = B_X \\
 \text{Si } Y \geq Y_I - B_Y : \quad & u_0(Y) = \delta \cdot \frac{Y}{Y_I - B_Y} & d_0(Y) = B_X \frac{Y}{Y_I - B_Y}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Où les profils de $u_0(Y)$ et $d_0(Y)$ sont représentés à la figure 2.8b. selon les considérations précédentes, le champ de déplacement global $u(Z, Y)$ doit respecter les différentes conditions suivantes :

$$\begin{aligned}
 u(X, Y) = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad \text{si } X = 0 \text{ ou } X = l \\
 u(X, Y) = u_0(Y) \quad \text{si } X = \frac{l}{2 - d_0/2} \text{ ou } X = \frac{l}{2 + d_0/2}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Les équations ci-dessus peuvent être satisfaites si $u(X, Y)$ est défini en utilisant les trois fonctions cubiques compatibles suivantes, chacune d'elles sont valables sur une partie

de poutre :

$$\begin{aligned}
 u(X, Y) &= u_0(Y) \cdot \frac{3(l^2 - d_0^2) - 4X^2}{(l - d_0)^2(l + 2d_0)} \cdot X \quad \text{si } 0 \leq X < \frac{l}{2 - d_0/2} \\
 u(X, Y) &= u_0(Y) \left(\frac{1 - 6(X - \frac{l+d_0}{2})(X - \frac{l-d_0}{2})}{(l - d_0)(l + 2d_0)} \right) \quad \text{si } \frac{l}{2 - d_0/2} \leq X \leq \frac{l}{2 + d_0/2} \\
 u(X, Y) &= u_0(Y) \frac{3(l^2 - d_0^2) - 4(l - X)^2}{(l - d_0)^2(l + 2d_0)} (l - X) \quad \text{si } \frac{l}{2 + d_0/2} < X \leq l
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Considérant son champ de déplacement cinématiquement admissible, le moment de flexion $M_i(X)$ et les forces de cisaillement $V_i(X)$ dans la poutre n^oi localisée en $Y = Y_i$ peuvent être obtenus en utilisant les formules suivantes :

$$M_i(X) = -EI \frac{\partial^2 u_i}{\partial X^2} \quad : \quad V_i(X) = -EI \frac{\partial^3 u_i}{\partial X^3} \quad : \quad u_i = u(X_i, Z) \tag{2.12}$$

Où E est le module de Young et I_i est l'inertie de la section transversale représentée à la figure 2.8a, tenant compte de la partie de plaque collaborante. Sous l'hypothèse que les déplacements hors-plan restent petits dans la déformation élastique, la membrane en tension de chaque poutre peut être négligée. De plus, si l'énergie de cisaillement est négligée en ce qui concerne la flexion, la dissipation interne associée à la poutre n^oi peut être évaluée selon :

$$\dot{E}_{int,i} = \int_0^l M_i(X) \frac{\partial^2 \dot{u}_i}{\partial X^2} dX = -EI_i \int_0^l \frac{\partial^2 u_i}{\partial X^2} \cdot \frac{\partial^2 \dot{u}_i}{\partial X^2} dX \tag{2.13}$$

Dans laquelle l'équation (2.12) a été utilisée pour évaluée $M_i(X)$. Le taux d'énergie interne totale \dot{E}_{int} pour la déformation élastique de la porte est obtenu en sommant les contributions $\dot{E}_{int,i}$ de toutes les poutres. Comme \dot{E}_{int} est égal à la puissance externe $\dot{W} = P_e \cdot \dot{\delta}$, il peut finalement être montré que :

$$P_e = \frac{\dot{E}_{int}}{\dot{\delta}} = \sum_i^{N_h} \frac{\dot{E}_{int,i}}{\dot{\delta}} \quad : \quad P_{e,i} = \frac{48EI_i}{(l - d_0)^2(l + 2d_0)} \frac{u_0(Y_i) \partial u_0}{\partial \delta} \tag{2.14}$$

Où N_h est le nombre de poutres horizontales et $P_{e,i}$ est la contribution individuelle de la poutre n^oi. Dans cette relation, u_0 et $\frac{\partial u_0}{\partial X}$ peut être calculé à partir de (2.9).

Détermination de la force de transition

Lorsque P_c et P_e sont connus, la résistance P_L de la porte est associée à un mode local calculé selon l'équation (2.2). Cependant, les développements analytiques, utilisés à la section précédente, sont valides tant que les poutres ne s'effondrent pas. Cela peut se produire dans deux cas différents.

Le premier mode de ruine à considérer pour une poutre qui est soumise à des forces de flexion prédominantes est le développement de rotules plastiques. Selon l'équation (2.12), ces dernières apparaissent simultanément dans la section transversale localisées en $X = l/2 - d_0/2$ et $X = l/2 + d_0/2$ où $M_i(X)$ est maximum. En introduisant (2.11) dans (2.12), il peut être montré que :

$$M_i = \max_{0 \leq Z \leq l} M_i(x) = \frac{12EI_i}{(l - d_0)(l + 2d_0)} u_0(Y_i) \quad (2.15)$$

Ensuite, si $M_{p,i}$ désigne la capacité à la flexion plastique de la poutre n°i, la ruine de cette dernière sera atteinte lorsque le déplacement $u_0(Y_i)$ atteindra la valeur suivante :

$$M_i = M_{p,i} \quad \Leftrightarrow \quad u_0(Y_i) = \frac{(l - d_0)(l + 2d_0)}{12EI_i} M_{p,i} \quad (2.16)$$

A ce moment, la contribution individuelle $P_{e,i}$ de la poutre est maximale et ne peut plus augmenter car un mécanisme plastique est formé. Lorsque $u_0(Y_i)$ est donné par (2.16), la valeur particulière de $P_{e,i}$ peut être évaluée en utilisant (2.14) et peut être trouvée par :

$$P_{e,i} = \frac{4M_{p,i}}{l - d_0} \frac{\partial u_0}{\partial \delta} \quad (2.17)$$

De plus, avec le déplacement des rotules plastique, un second mode de ruine doit être considéré. En effet, comme l'intervalle entre le navire et la porte d'écluse est souvent très petit, d'importantes forces de cisaillement peuvent se développer près des bords verticaux, donc la résistance doit être vérifiée près des appuis. Pour une poutre localisée au niveau Y_i le long de l'axe vertical, introduisant (2.11) dans (2.12) il vient :

$$V_i = \max_{0 \leq Z \leq l} V_i(X) = \frac{24EI_i}{(l - d_0)^2(l + 2d_0)} u_0(Y_i) \quad (2.18)$$

Afin de calculer la capacité au cisaillement $V_{p,i}$ de la poutre n°i, la poutre peut être vue comme une structure à parois minces qui est régulière et raidie dans la direction transversale par N_v cadres verticaux. Elle peut donc être divisée en $N_v - 1$ panneaux successifs (figure 2.9a), chacun d'entre eux ayant une longueur $l/(N_v - 1)$ et une hauteur h_w . Pour cette configuration, la détermination de $V_{p,i}$ doit être faite en considérant une potentielle déformation par cisaillement qui se développe rapidement, comme illustré à la figure 2.9b. Celle-ci peut être décrite par les relations :

$$V_{p,i} = \tau_{cr} h_w t_w \quad : \quad \tau_{cr} = \min \left\{ \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} ; k_\tau \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{l/(N_v-1)} \right)^2 \right\} \quad (2.19)$$

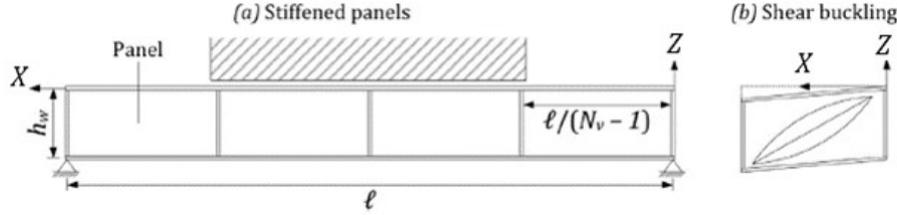


FIGURE 2.9 – Résistance au cisaillement de la poutre impactée

Où t_w est l'épaisseur du réseau, ν est le coefficient de poisson et k_τ est le coefficient de flambage. Ce dernier est probablement le paramètre le plus difficile à évaluer, puisqu'il doit tenir compte de la flexibilité dans les raidisseurs transversaux. Comme le suggérait Johansson et al. [9], k_τ peut être déterminé en réalisant des analyses, mais cette approche n'est pas bien adaptée à la présente méthode simplifiée. Pour cette raison, il est décidé d'adopter les formules suivantes :

$$k_\tau = 5,35 + 4 \left(\frac{l/(N_v-1)}{h_w} \right)^2 \quad \text{si} \quad \frac{l/(N_v-1)}{h_w} \geq 1 \quad (2.20)$$

$$k_\tau = 5,35 \cdot \left(\frac{l/(N_v-1)}{h_w} \right)^2 + 4 \quad \text{si} \quad \frac{l/(N_v-1)}{h_w} < 1$$

Bien qu'elles ne soient valides que pour les renforts parfaitement rigides et que les cadres verticaux ne satisfont pas cette condition, l'évaluation de $V_{p,i}$ est probablement surestimée.

Selon la même procédure que le mode de ruine par flexion, il est possible de calculer le déplacement $u_0(Y_i)$ correspondant à la ruine par cisaillement de la poutre. En combinant les équations (2.18) et (2.19), il vient :

$$u_0(Y_i) = \frac{(l - d_0)^2(l + 2d_0)}{24EI_i} V_{p,i} \quad (2.21)$$

Pour cette valeur particulière de $u_0(Y_i)$, la contribution $P_{e,i}$ de la poutre n°i à la résistance élastique P_e peut être obtenue en substituant (2.21) dans (2.14), ce qui donne l'expression suivante :

$$P_{e,i} = 2V_{p,i} \frac{\partial u_0}{\partial \delta} \quad (2.22)$$

Pour les considérations précédentes, il apparait que la poutre n^oi s'effondre lorsque sa contribution individuelle $P_{e,i}$ atteint la valeur particulière donnée par :

$$P_{t,i} = \min \left\{ \frac{4M_{p,i}}{l-d_0} \frac{\partial u_0}{\partial \delta} \quad ; \quad \frac{2V_{p,i}}{\partial \delta} \frac{\partial u_0}{\partial \delta} \right\} \quad (2.23)$$

Qui n'est rien d'autre que le minimum de (2.17) et (2.22) correspondant respectivement au mode de déformation par flexion ou par cisaillement. En conclusion, un mécanisme est activé sur la poutre entière de l'écluse lorsque toutes les poutres ont atteint leur charge de ruine $P_{t,i}$. En d'autres mots, cela se produit lorsque la résistance locale P_L est égale à la valeur de transition P_t qui est donnée par :

$$P_t = \sum_i^{N_h} P_{t,i} = \sum_i^{N_h} \min \left\{ \frac{4M_{p,i}}{l-d_0} \frac{\partial u_0}{\partial \delta} \quad ; \quad \frac{2V_{p,i}}{\partial \delta} \frac{\partial u_0}{\partial \delta} \right\} \quad (2.24)$$

La valeur particulière δ_t de déplacement du navire pour lequel $P_L = P_t$ est appelé la pénétration de transition. Pour $\delta > \delta_t$, la résistance n'est plus donnée par P_L et doit être calculée d'une manière différente.

Détermination de la résistance globale

Une fois que P_t est atteint, un mécanisme global se développe sur l'entièreté de la porte et toutes les poutres sont soumises à des déformations de flexion et de cisaillement. La résistance globale P_G lorsque $\delta > \delta_t$ doit donc être évaluée pour cette situation particulière.

Commençons la détermination de P_G en considérant d'abord la contribution d'une poutre soumise à un mécanisme plastique de flexion. Selon la méthode de la limite supérieure, un champ de déplacement cinématiquement admissible $u(X, Y)$ est proposé. Durant le mode global, ce dernier peut être approximé par l'interpolation linéaire décrite à la figure 2.10a, où l'équation (2.9) peut être utilisée pour obtenir $u_0(Y)$. Donc, $u(X, Y)$ peut-être écrit par :

$$\begin{aligned} u(X, Y) &= u_0(Y) \frac{X}{l} \quad ; \quad \text{si } 0 \leq X < l/2 - d_0/2 \\ u(X, Y) &= u_0(Y) \quad ; \quad \text{si } l/2 - d_0/2 \leq X \leq l/2 + d_0/2 \\ u(X, Y) &= u_0(Y) \cdot \frac{l-X}{l} \quad ; \quad \text{si } l/2 + d_0/2 \leq X \leq l \end{aligned} \quad (2.25)$$

Pendant le mode global, le mécanisme évolue selon deux rotules plastiques qui se développent dans deux sections transversales séparées par la distance $d_0(Y)$. Le taux d'énergie $\dot{E}_{int,i}$ associé à la poutre n^oi est alors dû uniquement à la dissipation plastique dans les deux rotules. Dénnotant θ l'angle de rotation, il vient :

$$\dot{E}_{int,i} = 2M_{p,i}\dot{\theta} \quad ; \quad \dot{\theta} = \frac{2}{l-d_0} \cdot \frac{\partial u_0}{\partial \delta} \cdot \dot{\delta} \quad (2.26)$$

La relation précédente est uniquement valable sous l'hypothèse de déplacements modérés. De plus, on suppose qu'aucune force de membrane ne se développe dans la poutre, ce qui signifie que sa longueur l ne varie pas durant la déformation. Par conséquent, un champ de déplacement plan additionnel $w(Y)$ doit également être considéré au niveau des appuis.

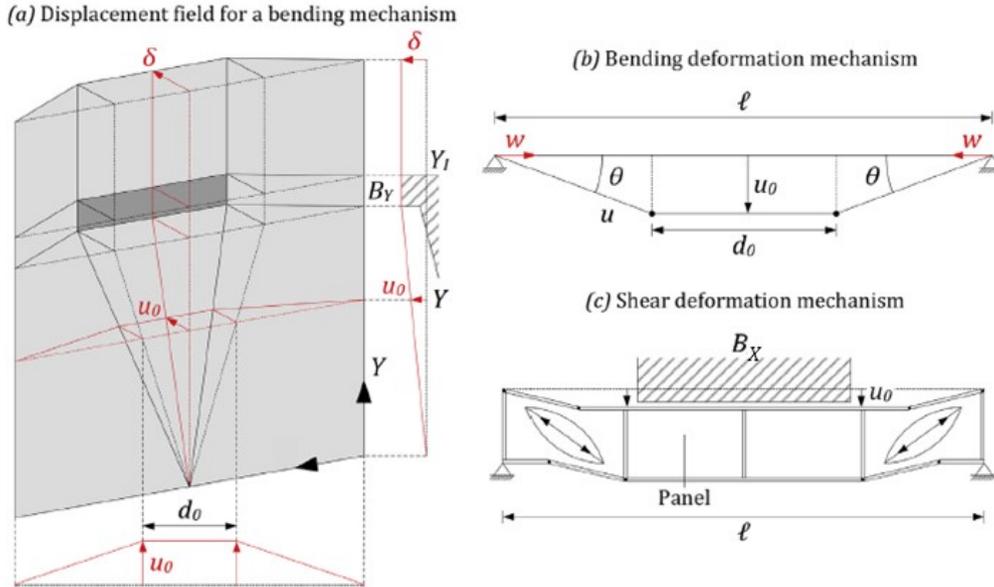


FIGURE 2.10 – Caractéristiques du mode global

Cependant, puisque celui-ci est très petit, son effet sur la géométrie peut être négligé comme première approximation. Cette approche est conservative, car elle suppose que chaque poutre peut bouger librement sur le mur d'écluse sans être contraint axialement par les cadres verticaux.

Dans le cas d'un mode de déformation par cisaillement, l'équation (2.26) ne peut plus être utilisée. Selon la section "Détermination de la force de transition", le flambement se produit lorsque la capacité de cisaillement $V_{p,i}$ est atteinte. A ce moment, la contribution de la poutre n^oi est donnée par l'équation (2.22) mais cette valeur ne peut pas être dépassée car la résistance ultime au cisaillement n'est pas encore atteinte. En effet, comme illustré à la figure 2.10c, tous les panneaux localisés entre le bateau et les supports sont supposés développer un champ de contraintes de traction qui permet à la poutre de se comporter comme un treillis, ce qui permet une force additionnelle.

Ce processus de déformation a été adapté pour obtenir le résultat suivant :

$$\dot{E}_{int,i} = 2 \left(V_{p,i} + \sigma_t t_w \left(h_w \cdot \cot \theta_t + c - \frac{l}{N_v - 1} \right) \sin^2 \theta_t + \frac{\sigma_0 \cdot h_f \cdot t_f^2}{4c} + \frac{\sigma_0 \cdot h_{\acute{e}q} \cdot t_{\acute{e}q}^2}{4c} \right) \cdot \frac{\partial u_0}{\partial \delta} \dot{\delta} \quad (2.27)$$

Ce qui n'est rien d'autre que le taux d'énergie interne associé au mécanisme de post-flambement montré à la figure 2.10c. Une fois le taux d'énergie individuel calculé par (2.26) et (2.27), ils sont sommés pour obtenir \dot{E}_{int} sur l'entièreté de la porte. Comme d'habitude, égaliser \dot{E}_{int} à la puissance externe $\dot{W} = P_G \dot{\delta}$ mène à l'expression de P_G :

$$P_G = \frac{\dot{E}_{int}}{\dot{\delta}} = \sum_{i=1}^{N_h} \frac{\dot{E}_{int,i}}{\dot{\delta}} = \sum_{i=1}^{N_h} P_{G,i} \quad (2.28)$$

Où $P_{G,i} = \dot{E}_{int,i}/\dot{\delta}$ désigne la contribution de la poutre n°i dans la résistance globale. Bien sûr, ce dernier dépend du mode de déformation.

Tous les développements précédents peuvent être résumés en considérant les courbes de la figure 2.11. Ces graphiques présentent la contribution individuelle de la poutre n°i durant les modes de déformations globaux et locaux comme une fonction du déplacement central $u_0(Y_i)$. Durant le mode local, la résistance de la poutre est calculée en supposant un champ de déplacement élastique de l'entièreté de la porte et donc $P_{e,i}$ est donnée par (2.14). Cependant, cette détermination est valide aussi longtemps que la déformation de la porte reste élastique et prend fin lorsque la valeur limite $P_{t,i}$ est atteinte. Selon (2.23), un mécanisme est activé si la capacité de flexion $M_{p,i}$ ou si la capacité au cisaillement $V_{p,i}$ est dépassée.

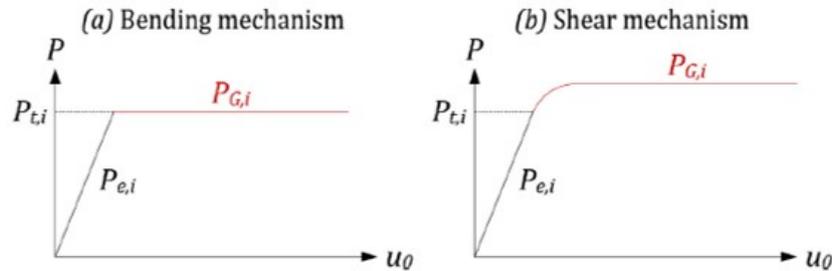


FIGURE 2.11 – Contribution individuelle de la poutre i

A partir de là, si le mécanisme de flexion de la figure 2.10b est activé, il apparaît à partir de (2.26) que la résistance ne peut plus augmenter, donc la contribution $P_{G,i}$ de la résistance globale reste constante et égale à $P_{t,i}$ (Figure 2.11a). D'un autre côté, tant que le mécanisme de cisaillement de la figure 2.10c est concerné, P_{Gni} peut dépasser $P_{t,i}$ (Figure 2.11b) en tendant asymptotiquement vers la limite calculée selon (2.27).

Evidemment, les considérations précédentes visent à modéliser le mode de déformation global de la porte, qui est vu comme un ensemble de poutres horizontales, mais il ne faut pas oublier que la décomposition en super éléments est également nécessaire pour modéliser le mode de compression local.

2.2 Optimisation des structures

[Lors de l'étude préliminaire d'un projet, la conception et le dimensionnement des structures navales requiert une optimisation. Des logiciels d'optimisation de structures orthotropes hydrauliques et navales tels que *LBR - 5* ont donc été modélisés. L'objectif poursuivi par ces logiciels est d'adjoindre aux outils traditionnels de conception un module de dimensionnement rationnel qui, dès le stade de l'avant-projet permet :

- une analyse du comportement d'ensemble de la structure ou au moins du maître couple ;
- une prise en compte explicite de tous les états limites afférents à la structure (états limites de services et états limites ultimes) grâce à une analyse rationnelle de la structure. Par analyse rationnelle, il faut comprendre un ensemble cohérent et homogène des méthodes pratiques de calcul, dites rationnelles, qui reposent sur la physique, la mécanique des milieux continus, la résistance des matériaux, ... et qui se différencient des formulations empiriques ou paramétriques ;
- dès le stade de l'avant-projet, une optimisation de l'échantillonnage (dimensions) des éléments constitutifs de la structure ;
- l'intégration des coûts de construction et de fabrication dans le processus d'optimisation via une fonction objectif coût.
- ...

Cet outil se révèle particulièrement intéressant en phase d'avant-projet. En effet, durant cette phase, peu de paramètres sont définitivement fixés et une modélisation aux éléments finis est impraticable pour des raisons de budget, de durée de modélisation, de données disponibles,...] [Ph. RIGO, 'L'optimisation des structures navales - Minimisation du coût de construction de la coque métallique. 2002.][13]

Une fois les paramètres influençant la résistance de la porte d'écluse identifiés par analyse numérique et en complément aux analyses analytiques réalisées précédemment, ceux-ci seront implémentés dans le logiciel d'optimisation. Cela permettra, lors d'une optimisation d'une porte d'écluse dont la géométrie est fixée de jouer sur les éléments constitutifs ayant un rôle prépondérant dans la résistance de la porte.

Chapitre 3

Portes et modèles étudiés

Le but de mon TFE est donc d'étudier, par éléments finis, la résistance de la porte lorsque celle-ci est impactée par un bateau. Les méthodes aux éléments finis sont des outils très puissants qui permettent de connaître les contraintes et les déformations locales se développant à l'intérieur de la structure. Il est cependant nécessaire de garder un œil critique sur les résultats obtenus.

Pour ce faire, deux portes sont modélisées et étudiées.

La première porte étudiée est la «Porte de 13m». Elle est basée sur le modèle étudié par Th. Gernay dans le cadre de son TFE « Aménagement de la voie navigable« Seine-Escaut Est » » [7]. En effet, lors de son travail, Th Gernay avait conçu et optimisé une porte d'écluse au moyen du logiciel d'optimisation des panneaux raidis LBR-5, sur base d'une méthode comparant un nombre représentatif de solutions optimisées en prenant en compte à la fois les aspects de coût et de poids de la structure. Cette porte nous permettra d'identifier, pour une porte de géométrie carrée définie, les éléments constitutifs apportant une résistance accrue à la porte.

Un second modèle, nommé «porte de 26m», est ensuite conçu et vérifié à l'aide du logiciel LBR-5. Cette seconde porte permet de mettre en évidence les éléments constitutifs apportant une résistance accrue pour une porte ayant une longueur plus importante que sa hauteur.

Une fois que les deux portes pré-citées ont été modélisées aux éléments finis sous le logiciel Patran, différents modèles sont créés. Ces modèles font varier l'épaisseur d'un type d'élément constitutif de la porte tels que le bordé ou encore les semelles des cadres. Ces différents modèles créés nous permettront, suite aux simulations, de définir si l'élément modifié apporte une résistance considérable à la porte pour la configuration étudiée.

Afin de modéliser un processus complet de collision réaliste, un bateau de référence est également étudié et modélisé sous ce même logiciel. Ensuite, différents points d'impact sont envisagés et appliqués à chaque modèle.

3.1 Modélisation aux éléments finis de la Porte de 13m

Dans un premier temps, la porte étudiée par Th. Gernay dans son Travail de Fin d'Etude [7] a été modélisée et étudiée sous le choc d'un bateau de référence. Ensuite, certains paramètres tels que l'épaisseur des éléments ou la position de l'impact seront modifiés afin d'évaluer la variation de résistance. Pour cela, la géométrie de cette porte est modélisée dans le logiciel PATRAN. Ensuite, une simulation dynamique de collision entre la porte et le bateau est réalisée dans le logiciel LS-DYNA.

La porte étudiée est une porte plane telles que des portes levantes ou à déplacement latéral constituée d'un simple bordage plan raidi par des cadres, des traverses et des raidisseurs. Le bordé de la porte sera positionné en côté amont afin que les traverses, cadres et raidisseurs soient comprimés.

3.1.1 Modèle Patran

Le logiciel Patran permet de construire le modèle aux éléments finis, lui donner des propriétés de matériaux, des conditions limites et mailler cet élément.

Définition du modèle

Les dimensions retenues sont celles retenues par Th. Gernay dans son TFE "*Aménagement de la voie navigable "Seine-Escaut Est"*", pages 102-103 2008-2009. [7]

Nous reprenons donc l'ensemble de ces dimensions ci-dessous :

- Largeur : 13,70 m
- Hauteur : 13,60 m
- Epaisseur : 1m

Bordé

Le bordé est constitué de plaques d'acier dont l'épaisseur varie selon la direction y. L'épaisseur est de :

Hauteur (m)	Epaisseur du bordé (mm)
0 à 0,6	10
0,6 à 2,6	11
2,6 à 6,6	12
6,6 à 10,60	11
10,60 à 13,60	10

TABLE 3.1 – Dimensions des traverses - porte de 13m

Les épaisseurs référencées dans le tableau ci-dessus sont des épaisseurs nettes, c'est-à-dire que l'épaisseur de corrosion n'est pas prise en compte.

Cadres :

Les cadres ont pour fonction de transmettre les sollicitations provenant du bordé vers les traverses.

Six cadres en forme de T renforcent la porte de 13m. Ces cadres sont espacés de 2.62m et sont situés à 0,3m des deux extrémités de la porte. Les cadres ont pour dimensions : 1000 × 20 – 300 × 25mm, où les premières dimensions concernent l'âme des cadres et les secondes celles des semelles.

Traverses :

Les traverses sont considérées comme des éléments bi-appuyés soudés au bordé. Elles transfèrent les charges provenant des cadres vers les appuis.

Cinq traverses en forme de T renforcent la porte de 13m. L'espacement entre les traverses varie selon l'axe Z. L'entre-axes des traverses est réduit au pied de la porte et augmente vers la tête de la structure afin de reprendre la pression hydrostatique plus importante en partie basse de la porte.

Traverse	Position	Hauteur de l'âme	Épaisseur de l'âme	Largeur de la semelle	Épaisseur de la semelle
1	0,3 m	1000	20	600	25
2	2,6 m	1000	20	500	25
3	5,1 m	1000	20	500	25
4	8,1 m	1000	20	600	35
5	13,4 m	1000	25	400	25

TABLE 3.2 – Dimensions des traverses - Porte de 13m

Raidisseurs :

Les raidisseurs sont soudés au bordé et sont continus sur la longueur de la porte.

Les raidisseurs sont positionnés entre les traverses avec un espacement variant de 0,46m et 0,6m. Ces éléments de raidissage sont également en forme de T.

Partie	Position	Nombre de raidisseurs	Espacement des raidisseurs	Dimensions des raidisseurs
Entre traverses 1 et 2	De 0,3m à 2,6m	4	0,46m	210 × 6 – 100 × 9
Entre traverses 2 et 3	De 2,6m à 5,1m	4	0,5m	210 × 6 – 100 × 7
Entre traverses 3 et 4	De 5,1m à 8,1m	2	0,6m	210 × 6 – 90 × 8
		2	0,6m	200 × 10 – 85 × 10
Entre traverses 4 et 5	De 8,1m à 13,4m	4	0,589m	200 × 10 – 85 × 10
		4	0,589m	200 × 10 – 80 × 10

TABLE 3.3 – Dimensions des raidisseurs - Porte de 13m

La figure 3.1 présente une vue en plan et des vues en élévation de la Porte de 13m. Les différents éléments constitutifs tels que les traverses, les cadres et les raidisseurs décrits ci-dessus y sont représentés respectivement en orange, en bleu et en vert.

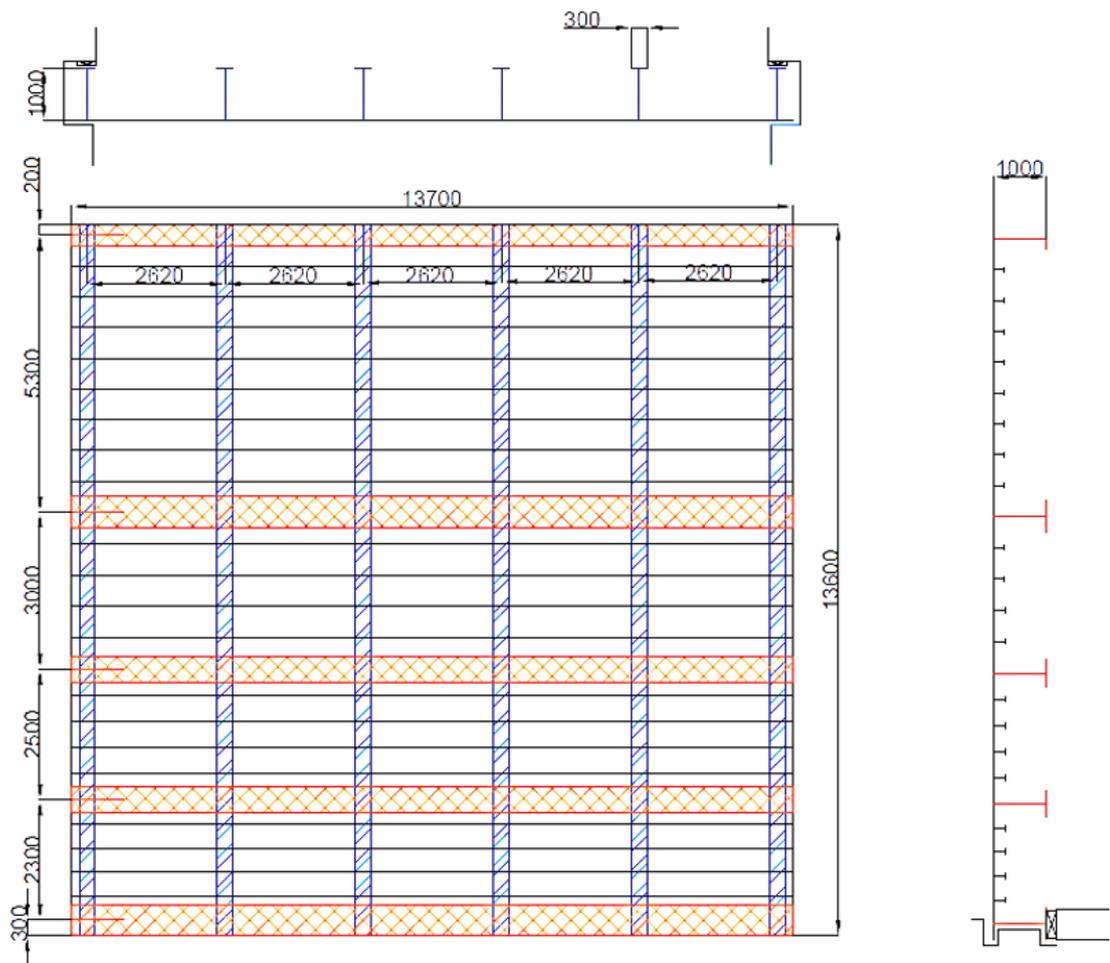


FIGURE 3.1 – Vues en plan et en élévation - Porte de 13m

Matériaux

Une fois la géométrie définie, les propriétés des matériaux et les épaisseurs doivent être définies dans Patran et appliquées à chaque élément constitutif de la porte. Pour cela, les éléments ont été classés en différentes parts.

Tous les éléments sont définis comme des éléments plaques.

La porte est en acier et suit une loi élastique-parfaitement plastique. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Masse volumique : $7850\text{kg}/\text{m}^3$
- Module élastique : $E = 210000\text{MPa}$
- Coefficient de poisson : 0,33
- Limite élastique : 240MPa

Les bajoyers sont des éléments en béton suivant également une loi élastique-parfaitement plastique. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Masse volumique : $2250\text{kg}/\text{m}^3$
- Module élastique : $E = 35000\text{MPa}$
- Coefficient de poisson : 0,2
- Limite élastique : 15MPa

Maillage

Un maillage régulier est appliqué sur l'ensemble de la porte. La détermination de la taille du maillage est complexe. En effet, un maillage trop grossier entraîne des imprécisions dans les résultats alors qu'un maillage trop fin engendre des temps des calculs importants. Un maillage de 10 cm semble être un bon compromis entre précision et temps de calcul.

Un maillage plus grossier pour les bajoyers aurait pu être envisagé afin de réduire le temps de calcul. Cependant, les contacts entre éléments ne seraient pas respectés et les nœuds de la porte passeraient au travers du bajoyer.

Une vue en perspective de la porte est représentée à la figure 3.2. Les différentes couleurs permettent d'identifier les différentes parts définies précédemment. Nous constatons donc bien que le bordé comporte 3 épaisseurs différentes.

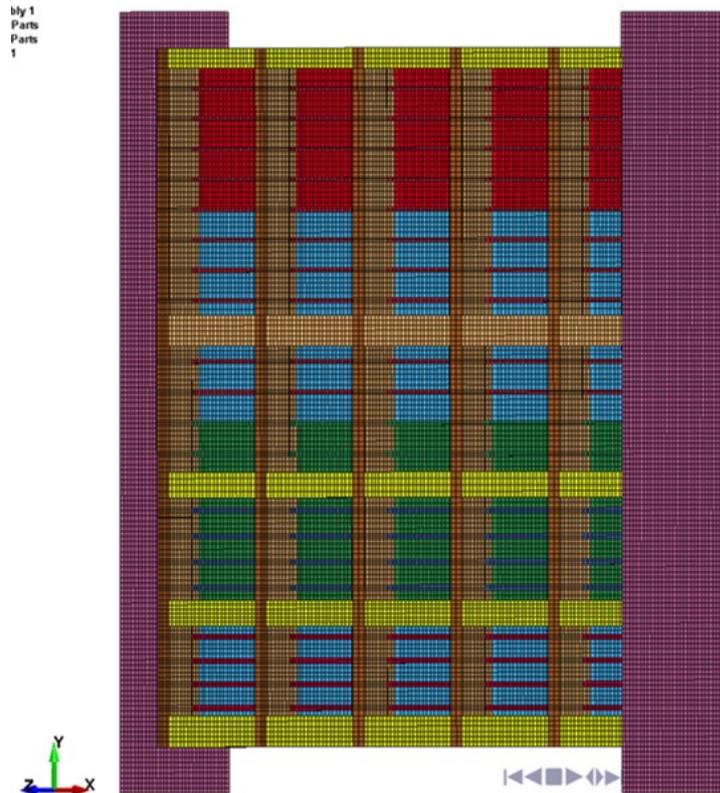


FIGURE 3.2 – Modélisation Porte de 13m

Une équivalence avec une tolérance de 5 millimètres est réalisée. Cela signifie que deux nœuds ayant une distance inférieure à 5 millimètres sont fusionnés. Cette équivalence a pour but de représenter au mieux le comportement physique de la porte. En effet, les cadres et traverses sont soudés entre-eux. Il est donc important que les nœuds situés à la rencontre cadre-traverse se comportent de façon identique afin de modéliser la jonction de ces éléments.

Conditions d'appuis

Les conditions d'appuis d'un tel modèle sont difficiles à représenter. La plupart du temps, elles sont approximatives car beaucoup d'éléments peuvent intervenir dans leur définition.

Les conditions d'appuis sont modélisées par des appuis ponctuels appliqués en certains nœuds.

Comme mentionné dans la section 2.1.1., le long des bords verticaux en $Z = 0$ et $Z = l$, la porte est appuyée sur les bajoyers de l'écluse. Cela signifie que les déplacements selon Z sont interdits. Afin d'éviter les mouvements de corps rigides, les déplacements selon l'axe Y sont également contraints en ces points. Les rotations ainsi que les déplacements selon l'axe X y sont autorisés.

La partie inférieure de la porte est appuyée sur le radier et sera bloquée en translation selon l'axe Z .

Afin de se rapprocher au maximum de la réalité, les bajoyers sont représentés afin d'empêcher la translation selon X de la porte. Les bajoyers, qui ont pour unique rôle d'empêcher une translation de la porte selon l'axe X , sont contraints en translation et en rotation dans les trois directions.

Il vient donc :

- Blocage selon Y et Z du bordé sur les côtés latéraux – représenté en rouge sur la vue en perspective ci-dessous
- Blocage selon Z du bordé sur le côté inférieur – représenté en bleu sur la vue en perspective ci-dessous

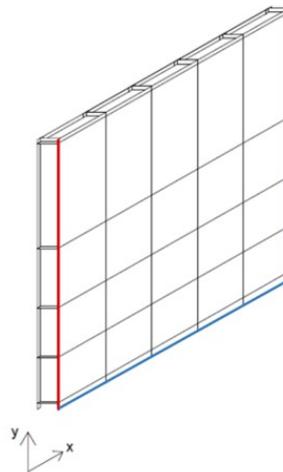


FIGURE 3.3 – Conditions d'appuis

3.1.2 Définition de l'impacteur

Afin de définir l'impacteur, il est nécessaire dans un premier temps de définir les caractéristiques du navire telles que sa forme, sa masse ou encore sa vitesse. Et ensuite déterminer le point d'impact du bateau sur la porte. La position de l'impact aura une importance considérable dans les scénarios de déformation de la porte.

Définition des propriétés du bateau

Il existe des bateaux de formes très variées qui peuvent entraîner des collisions différentes. Il est cependant impossible d'imaginer réaliser des modèles pour tous les types de bateaux.

Heureusement, il n'est pas nécessaire de réaliser des études pour toutes les formes de navires. En effet, d'après les études réalisées par Le Sourne et al. [20]., une collision d'un bateau à proue arrondie est plus critique qu'une collision d'une péniche. La raison principale est que dans le premier cas, l'impact est localisé dans une région réduite de la porte, alors que celle-ci est mieux distribuée sur la structure avec une péniche. A énergie cinétique

égale, l'enfoncement et les dommages causés à la porte seront donc plus importants dans le cas d'un bateau à proue arrondie.

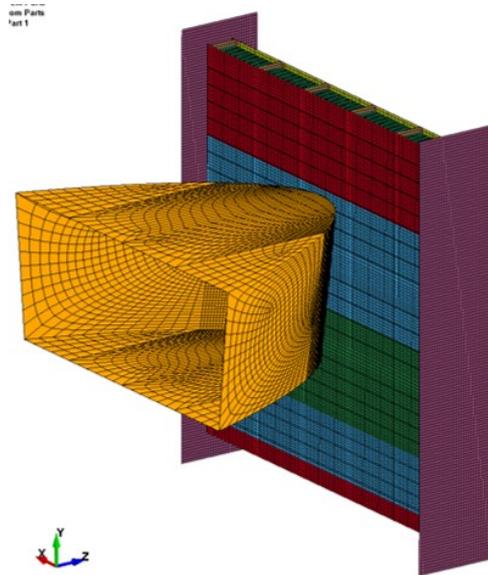


FIGURE 3.4 – Définition de l'impacteur

Matériau du bateau

Afin d'étudier la résistance de la porte soumise au choc d'un bateau, il convient de faire l'hypothèse que le bateau est parfaitement rigide afin que seule la porte ne se déforme. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Masse volumique : $7850\text{kg}/\text{m}^3$
- Module élastique : $E = 210000\text{MPa}$
- Coefficient de poisson : 0,33

Evaluation de l'énergie cinétique du bateau

L'énergie transmise à la porte est définie par la masse totale du bateau ainsi que par sa vitesse initiale. Cependant, ces paramètres ne sont pas clairement spécifiés.

La masse du bateau est fixée à 4000 tonnes.

Concernant la vitesse, il n'existe pas de recommandations particulières. Selon les informations collectées dans la littérature, la vitesse du bateau peut raisonnablement être choisie entre 0,15 et 2 m/s. Dans les modèles étudiés, une vitesse de 2m/s est fixée.

Ces bornes supérieures pour la masse et la vitesse du bateau ont été choisies car elles représentent clairement une situation défavorable qui engendre une déformation maximale de la porte. L'étude de l'enfoncement de bateau sera donc plus aisée avec ces hypothèses.

Définition de l'impact

Il existe une infinité de configurations pour définir l'impact du bateau sur la porte. Ces différents points d'impacts peuvent changer considérablement les résultats obtenus car les contraintes et déformations se développeront différemment d'un cas à l'autre.

Il y aura tout d'abord les impacts lorsque le bateau navigue vers l'aval. Dans ce cas, le point d'impact sera localisé sur la partie haute de la porte où le renforcement est plus faible. Ce cas d'impact est le plus courant et le plus dangereux. C'est donc principalement celui-là qui sera détaillé dans la suite de ce rapport.

Il y aura également les impacts lorsque le bateau navigue vers l'amont. Dans ce cas, le point d'impact sera localisé sur la partie basse de la porte.

Six configurations d'impact sont étudiées. Les impacts fixés pour la porte de 13m sont listées dans le tableau 3.4. L'impact se produit lorsque les éléments de raidissage sont orientés vers l'intérieur, la proue du bateau heurte donc le bordé.

Type d'impact	Position (X,Y)
Impact agissant entre les cadres et les traverses en partie supérieure de la porte	(6,85; 10,65)
Impact agissant sur l'intersection des cadres et des traverses en partie supérieure de la porte	(5,54; 8)
Impact agissant sur une traverse en partie supérieure de la porte	(6,85; 8)
Impact agissant sur un cadre en partie supérieure de la porte	(5,54; 10,65)
Impact agissant sur une traverse en partie inférieure de la porte	(6,85; 5,1)
Impact agissant sur un cadre en partie inférieure de la porte	(5,54; 6,6)

TABLE 3.4 – Dimensions des traverses - Porte 13m

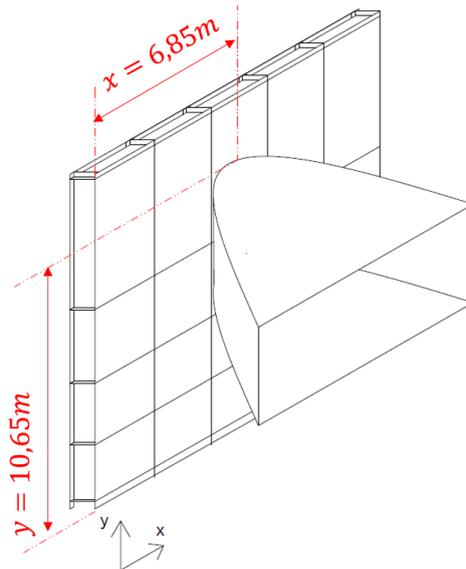


FIGURE 3.5 – Impact agissant entre les cadres et les traverses sur la partie haute de la porte

3.1.3 Paramètres LS-Dyna

L'analyse est réalisée sur une durée de 2 secondes. Cette durée est suffisante pour que le bateau percute la porte et que le rebond se fasse. De telle sorte, la porte est passée en régime plastique et sa déformation est globale.

L'analyse est réalisée avec un pas de temps de 0,005 seconde, qui représente une précision suffisante pour obtenir des résultats d'une qualité suffisante.

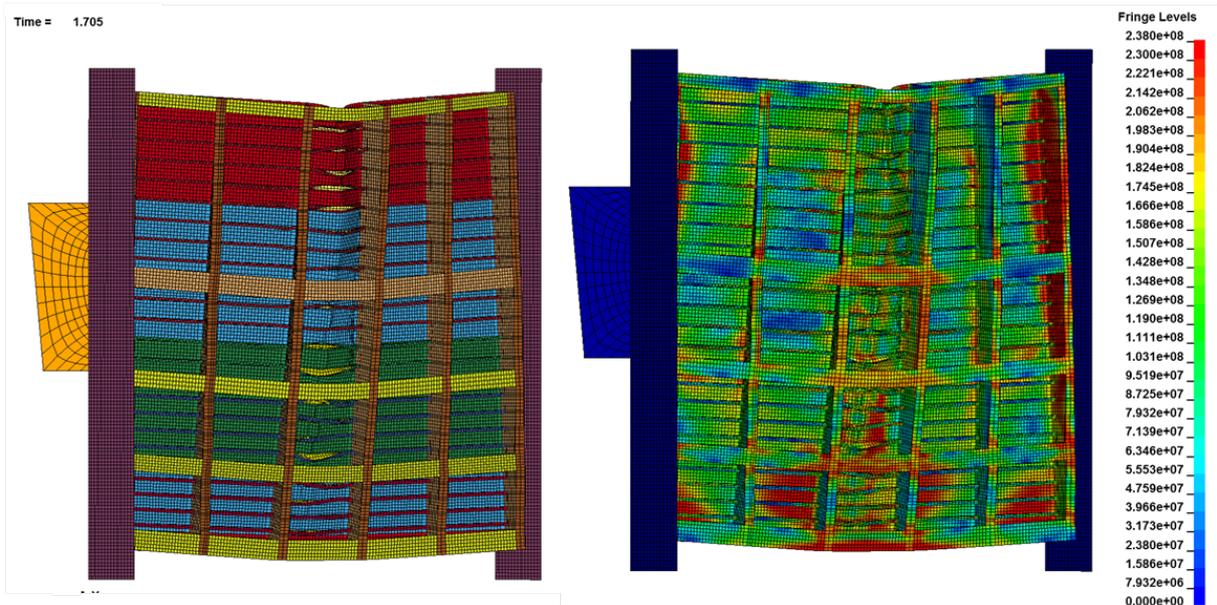


FIGURE 3.6 – Déformation de la porte

3.2 Porte 26m

Une seconde porte a été modélisée afin d'identifier les éléments structuraux ayant une influence importante sur la résistance au choc pour une géométrie différente. Cette porte aura une forme rectangulaire dont la longueur est deux fois plus importante que la hauteur.

Les dimensions de la porte de 26m sont les suivantes :

- Largeur : 26,5m
- Hauteur : 13,60m
- Epaisseur : 2m

3.2.1 Géométrie

Bordé

Comme dans le modèle de la porte de 13m, le bordé est constitué de plaques d'acier dont l'épaisseur varie selon la direction y. L'épaisseur du bordé est incrémentée de 3 mm.

L'épaisseur nette est donc de :

Hauteur (m)	Epaisseur du bordé (mm)
0 à 0,6	13
0,6 à 2,6	14
2,6 à 6,6	15
6,6 à 10,60	14
10,60 à 13,60	13

TABLE 3.5 – Dimensions des traverses - Porte de 26m

Les épaisseurs référencées dans le tableau ci-dessus sont des épaisseurs nettes, c'est-à-dire que l'épaisseur de corrosion n'est pas prise en compte.

Cadres :

Onze cadres en forme de T renforcent la porte de 26m. Ces cadres sont espacés de 2.62 m et sont situés à 0,3m des deux extrémités de la porte. Les cadres ont pour dimensions : 1000 mm × 20mm - 300mm × 25mm où les premières dimensions concernent l'âme des cadres et les secondes les semelles.

Traverses

Comme pour la porte de 13m, cinq traverses en forme de T renforcent la porte. L'espacement entre les traverses varie selon l'axe Z. L'entre axes est réduit au pied de la porte et augmente vers la tête de la porte afin de reprendre la pression hydrostatique plus importante en partie basse de la porte.

Comme la longueur de la porte est doublée, les efforts de moments dans les traverses sont plus importants. La hauteur d'âme a donc été doublée afin de reprendre cet effort.

Traverse	Position	Hauteur de l'âme	Épaisseur de l'âme	Largeur de la semelle	Épaisseur de la semelle
1	0,3 m	2000	20	600	25
2	2,6 m	2000	20	500	25
3	5,1 m	2000	20	500	25
4	8,1 m	2000	20	600	35
5	13,4 m	2000	25	400	25

TABLE 3.6 – Dimensions des traverses - Porte de 26m

Raidisseurs

Les raidisseurs sont identiques à ceux disposés dans la Porte de 13m.

Partie	Position	Nombre de raidisseurs	Espacement raidisseurs	Dimensions raidisseurs
Entre traverses 1 et 2	De 0,3m à 2,6m	4	0,46m	210 × 6 – 100 × 9
Entre traverses 2 et 3	De 2,6m à 5,1m	4	0,5m	210 × 6 – 100 × 7
Entre traverses 3 et 4	De 5,1m à 8,1m	2	0,6m	210 × 6 – 90 × 8
		2	0,6m	200 × 10 – 85 × 10
Entre traverses 4 et 5	De 8,1m à 13,4m	4	0,589m	200 × 10 – 85 × 10
		4	0,589m	200 × 10 – 80 × 10

TABLE 3.7 – Dimensions des raidisseurs - Porte de 26m

3.2.2 Vérification avec LBR-5

[Le logiciel LBR-5 est un outil intégré d'analyse et d'optimisation de structures orthotropes hydrauliques et navales. Cet outil à la particularité de permettre dès le stade de l'avant projet la vérification et l'optimisation du dimensionnement, c'est-à-dire lors de la phase initiale de conception.

Le dimensionnement optimum obtenu correspond au minimum du coût de construction qui est défini comme étant la fonction objectif $F(XI)$. Il est conditionné par le respect d'un ensemble de restrictions structurelles et géométriques $C(XI)$ fixées par l'utilisateur.

Le rôle de *LBR – 5* est, d'abord de rechercher une solution admissible (qui respecte l'ensemble des restrictions imposées) et ensuite de proposer à chaque itération une solution meilleure qui continue à respecter ces restrictions.

] [Ph. RIGO, 'L'optimisation des structures navales - Minimisation du coût de construction de la coque métallique. 2002.] [13]

La structure dont la géométrie a été définie précédemment est donc vérifiée sous le chargement de pression hydrostatique sous le logiciel LBR-5.

Restrictions structurelles

La porte a pour dimensions fixes $26,5m \times 13,6m \times 2m$ et est en acier $S235$. La vérification est réalisée selon une analyse élastique sous chargement hydrostatique.

Il convient de fixer des restrictions structurelles de la porte telles que la contrainte de Von Mises pour les éléments constitutifs ou les déplacements maximums à mi-portée. Le déplacement relatif est limité à $L/500$, soit à $53mm$ pour un élément d'une longueur de $26,5m$. Ces restrictions sont présentées au tableau 3.8

σ_{max}	Flèche max
240 MPa	53 mm

TABLE 3.8 – Restrictions structurelles

Sollicitations

Lors de son Travail de Fin d'Etudes, Th. Gernay avait considéré le cas de la porte de Viesville dont la hauteur d'eau amont est de $11,8m$. Le cas de chargement dimensionnant est celui pour lequel le bief aval est vide.

Dans un souci de cohérence, ce cas de chargement sera également utilisé pour optimiser la porte de $26m$ avec le logiciel *LBR – 5*.

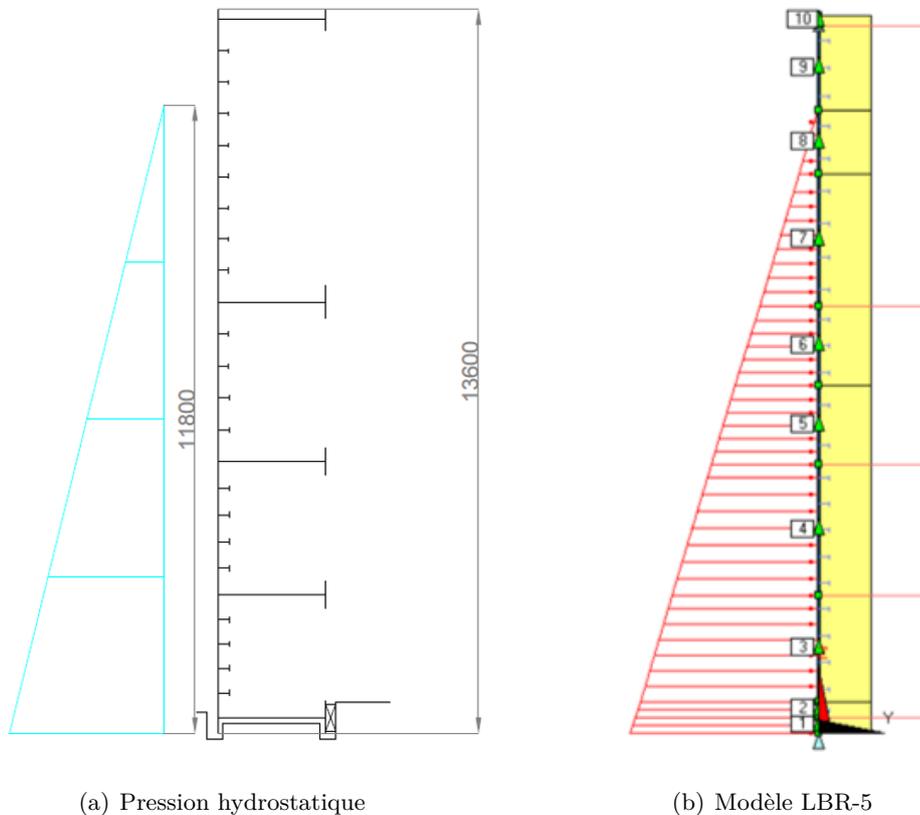


FIGURE 3.7 – Pression hydrostatique

Résultats de la vérification

Les valeurs de contraintes et de flèches maximales sont représentées dans le tableau 3.9.

	Résultats
Flèche maximale	52,85mm
σ_{VM} dans le bordé	115,55
σ_{VM} à la jonction âme-traverse des cadres	151,46
σ_{VM} à la jonction bordé-âmes des cadres	94,41

TABLE 3.9 – Résultats LBR-5 - porte de 26m

Les restrictions structurelles définies précédemment sont bien respectées. Les résultats des déplacements selon l'axe Y et des contraintes de Von Mises à la jonction des âmes et des semelles des cadres pour une section située à 13,25m soit à la demi-longueur de la porte sont représentés à la figure 3.8.

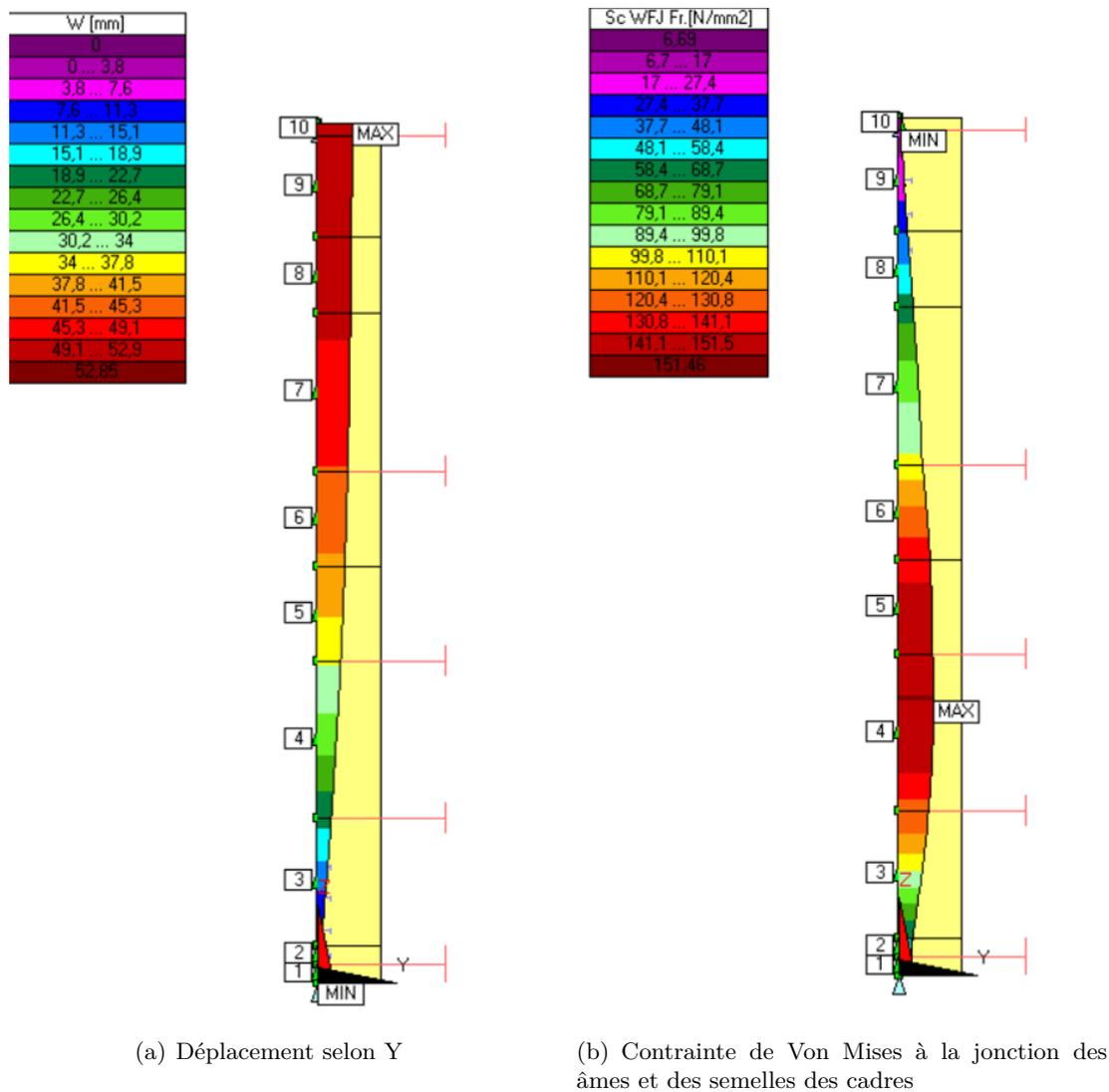


FIGURE 3.8 – Résultats LBR-5

La figure 3.9 présente une vue en plan et des vues en élévation de la porte de 26m. Les différents éléments constitutifs tels que les traverses, les cadres et les raidisseurs décrits ci-dessus y sont représentés respectivement en orange, en bleu et en vert.

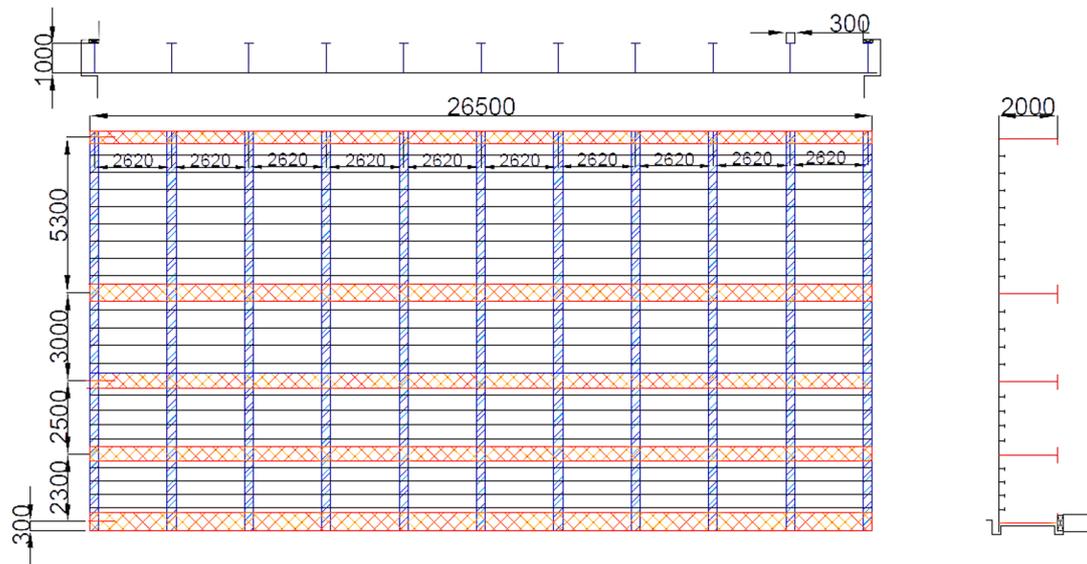


FIGURE 3.9 – Vues en plan et en élévation - porte de 26m

Des vues en perspective de la porte de 26m sont représentées à la figure 3.10 et 3.11. Sur la figure 3.10, les différentes couleurs permettent d'identifier les différentes parts définies précédemment. Ces vues en perspective montrent la déformée de la porte de 26m soumise à un impact sur une traverse.

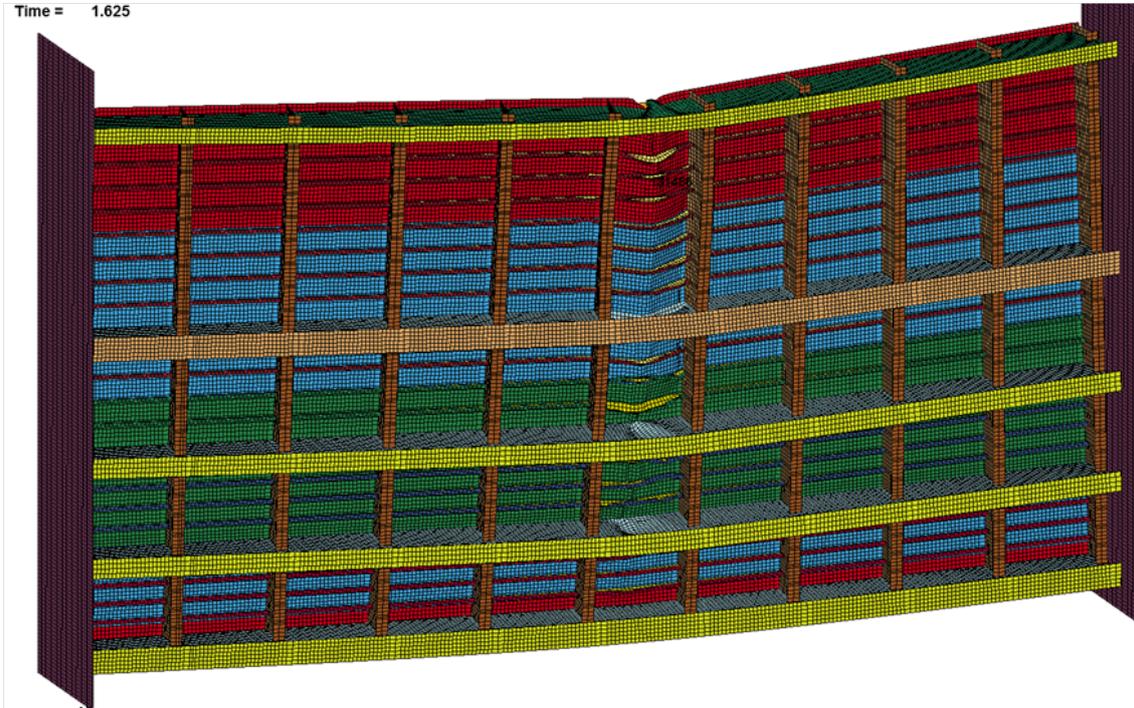


FIGURE 3.10 – Déformée de la porte de 26m

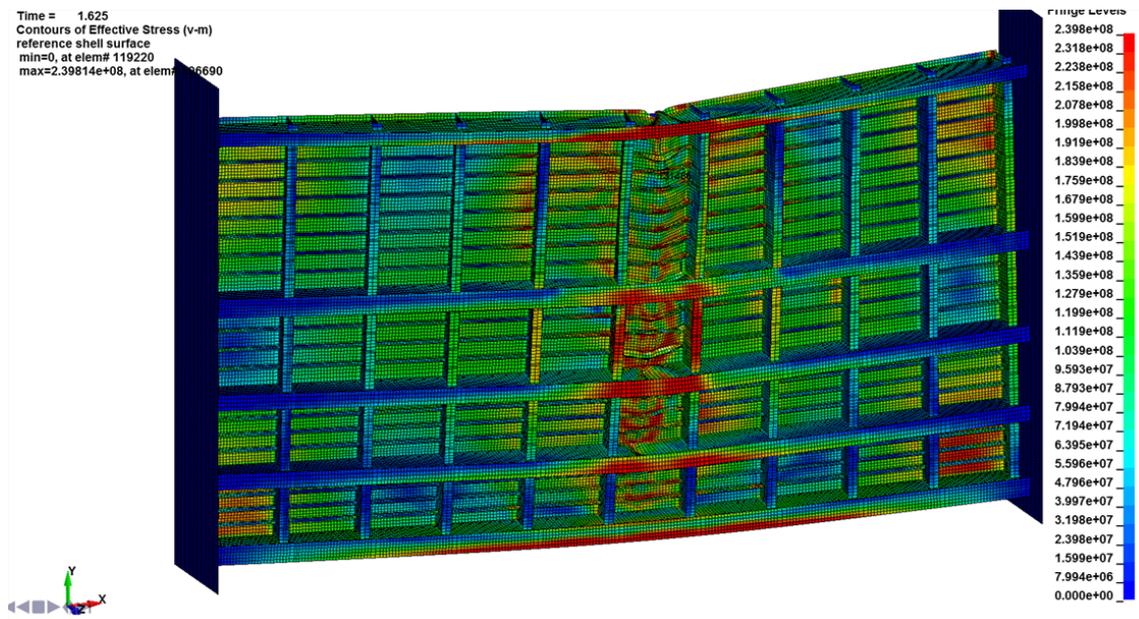


FIGURE 3.11 – Contraintes dans la porte de 26m

3.3 Définition des modèles

L'objectif du travail est d'identifier les paramètres essentiels, c'est-à-dire ceux qui contribuent significativement à la réduction de l'enfoncement maximal du navire ou à l'augmentation de l'effort repris par la porte. Dans ce but, différents modèles sont créés dans lesquels une augmentation d'épaisseur d'un type d'élément est apportée. Les enfoncements ou encore les efforts sont alors comparés au modèle de référence correspondant à la porte étudiée afin de connaître l'impact de cette augmentation.

Pour chaque cas d'impact et pour chaque type de porte, différents modèles ont donc été définis. Dans cette première partie, la géométrie de la porte reste constante et seules des modifications sont apportées à l'épaisseurs des éléments suivants :

- Epaisseur du bordé
- Epaisseur des semelles ou des âmes des cadres
- Epaisseur des semelles ou des âmes des traverses
- Epaisseur des semelles ou des âmes des raidisseurs

Cela signifie que la résistance de la porte est étudiée pour un nombre et une position des éléments constants. De plus, la hauteur des âmes et la largeur des semelles des cadres, des traverses et des raidisseurs ne changent pas.

Dans un premier temps, 21 modèles ont été créés par porte modélisée et par point d'impact envisagé. Pour chaque type d'élément, une courbe de l'enfoncement maximum en fonction du poids total de la porte a donc pu être tracée et comparée aux autres types d'éléments. Une courbe ayant une pente plus forte signifie que le type d'élément modifié apporte une résistance accrue à la porte étudiée pour le point d'impact considéré. Un exemple de ces courbes est représenté à la figure 4.2.

Des modèles supplémentaires ont été créés afin de connaître l'influence d'une augmentation d'épaisseur plus importante lorsque l'impact a lieu en différents points. En effet, l'allure des courbes ne nous permettaient pas toujours d'avancer de conclusions pertinentes quant aux éléments contribuant significativement à la réduction de l'enfoncement maximal du navire.

D'autres modèles ont également été créés afin d'obtenir des points intermédiaires et ainsi préciser l'allure des courbes obtenues.

Les premiers modèles sont repris dans le tableau 3.10 :

	Modifications	Poids [t]
Modèle de réf.	/	57,92
Modèle 1	+2,5% d'épaisseur au bordé	58,32
Modèle 2	+5% d'épaisseur au bordé	58,72
Modèle 3	+10% d'épaisseur au bordé	59,53
Modèle 4	+5% d'épaisseur aux âmes des traverses	58,48
Modèle 5	+7,5% d'épaisseur aux âmes des traverses	58,76
Modèle 6	+15% d'épaisseur aux âmes des traverses	59,61
Modèle 7	+5% d'épaisseur aux âmes des cadres	58,56
Modèle 8	+7,5% d'épaisseur aux âmes des cadres	58,88
Modèle 9	+15% d'épaisseur aux âmes des cadres	59,84
Modèle 10	+7,5% d'épaisseur aux semelles des traverses	58,49
Modèle 11	+10% d'épaisseur aux semelles des traverses	58,68
Modèle 12	+20% d'épaisseur aux semelles des traverses	59,44
Modèle 13	+5% d'épaisseur aux semelles des cadres	58,16
Modèle 14	+10% d'épaisseur aux semelles des cadres	58,40
Modèle 15	+25% d'épaisseur aux semelles des cadres	59,12
Modèle 16	+5% d'épaisseur aux âmes des raidisseurs	58,09
Modèle 17	+15% d'épaisseur aux âmes des raidisseurs	58,44
Modèle 18	+30% d'épaisseur aux âmes des raidisseurs	58,97
Modèle 19	+15% d'épaisseur aux semelles des raidisseurs	58,18
Modèle 20	+25% d'épaisseur aux semelles des raidisseurs	58,35
Modèle 21	+50% d'épaisseur aux semelles des raidisseurs	58,78

TABLE 3.10 – Définition des différents modèles

Les modèles supplémentaires sont repris dans le tableau 3.11

	Modifications	Poids [t]
Modèle 22.	+50% d'épaisseur au bordé	65,98
Modèle 23.	+75% d'épaisseurs aux âmes des traverses	66,39
Modèle 24.	+50% d'épaisseurs aux âmes des cadres	65,39
Modèle 25.	+100% d'épaisseurs aux semelles des traverses	65,55
Modèle 26.	+100% d'épaisseurs aux semelles des cadres	63,52
Modèle 27.	+150% d'épaisseurs aux âmes des raidisseurs	63,18
Modèle 28.	+200% d'épaisseurs aux semelles des raidisseurs	61,39

TABLE 3.11 – Définition des différents modèles

Chapitre 4

Étude des résultats

4.1 Enfoncement du bateau dans la porte

4.1.1 Enfoncement du bateau lors d'un impact sur la partie haute de la porte

Les enfoncements pour les différents modèles et différents points d'impact pour un bateau navigant vers l'aval sont obtenus après simulations et un graphique en fonction du poids total de la porte est tracé. Une courbe correspond à un type d'élément constitutif modifié.

Porte de 13m

L'enfoncement du bateau dans le modèle de référence de la Porte de 13m est représenté à la figure 4.1.

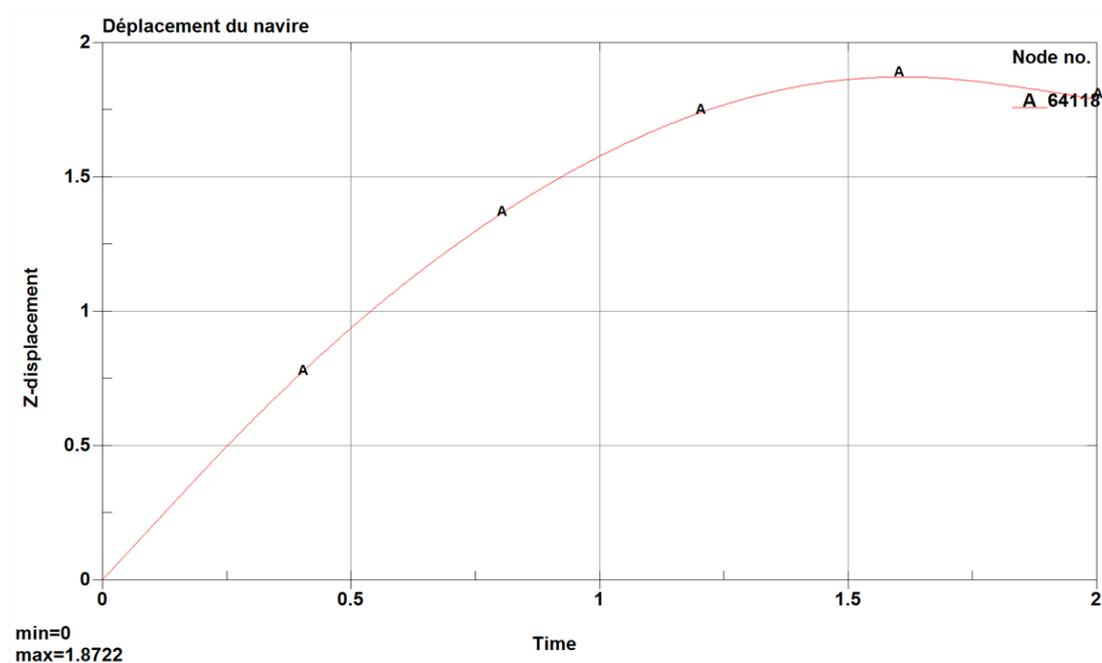


FIGURE 4.1 – Enfoncement maximum du bateau pour le modèle de référence

On voit donc que pour un poids total de la porte de $57,92t$, l'enfoncement maximal du bateau est de $1,8722m$. Connaissant ces points pour chaque modèle, le graphique de l'enfoncement en fonction du poids total de la porte peut être tracé. Ensuite, les résultats obtenus seront comparés afin de connaître l'élément ayant le plus d'impact sur l'enfoncement du navire.

Impact agissant entre les cadres et les traverses

Ce premier point d'impact est appliqué directement sur le bordé entre deux cadres et deux traverses. Pour chaque modèle défini préalablement, un enfoncement maximum a été calculé. Un graphique reportant l'enfoncement maximum du bateau en fonction du poids total de la porte a pu être tracé. Ce graphique est représenté à la figure 4.2.

Comme attendu, une variation d'épaisseur d'un élément de la porte provoque une diminution de l'enfoncement du bateau.

Cette réduction d'enfoncement est particulièrement marquée lorsque la modification est apportée aux raidisseurs, mais s'atténue avec l'augmentation de poids dans le cas des semelles des raidisseurs.

Par contre, une augmentation de l'épaisseur des âmes des cadres ou des semelles des traverses a une influence très réduite sur la variation de la résistance de la porte.

Une variation de l'épaisseur du bordé et des âmes des traverses a un impact similaire sur l'enfoncement du bateau dans la porte. De plus, la variation de l'enfoncement en fonction du poids de la porte semble avoir une allure linéaire contrairement aux semelles des raidisseurs.

Impact agissant sur une traverse

Ce second point d'impact est appliqué au niveau de l'âme d'une traverse lorsque le bateau navigue vers l'aval, c'est-à-dire pour un impact en position haute. Les résultats obtenus sont représentés à la figure 4.3

Pour de faibles augmentations d'épaisseur des différents éléments constitutifs, une augmentation de l'enfoncement du navire dans la porte est observée. Par exemple, dans le cas d'une augmentation de 5% des semelles des cadres, l'enfoncement augmente de $2,37cm$, ce qui représente une augmentation de 1,6% de l'enfoncement total. Ces résultats ne reflètent pas les comportements attendus.

En outre, pour des augmentations d'épaisseur plus importantes, les enfoncements observés diminuent et les résultats sont proches de ceux observés lors d'un impact agissant entre les cadres et les traverses.

En effet, une augmentation d'épaisseur des âmes des cadres, des semelles des traverses et des semelles des cadres a une influence réduite de la résistance sur la porte.

C'est, une fois de plus, dans le cas d'une augmentation des raidisseurs, du bordé ou des âmes des traverses que l'effet est le plus marqué.

Impact agissant sur un cadre

Les résultats obtenus lorsque l'impact se produit sur un cadre lorsque le bateau navigue vers l'aval, c'est-à-dire pour un impact en position haute sont représentés à la figure 4.4.

Dans le cas d'un impact sur un cadre, une augmentation de l'épaisseur des différents éléments constitutifs de la porte semble globalement induire une diminution de l'enfoncement.

Comme dans les cas précédents, cette diminution semble plus marquée dans le cas des raidisseurs, des âmes des traverses ainsi que du bordé. Une fois de plus, une variation d'épaisseur des semelles des cadres, des semelles des traverses ou des âmes des cadres ont une influence minime sur la résistance de la porte.

Impact agissant à l'intersection d'un cadre et d'une traverse

Les résultats obtenus lorsque l'impact se produit à l'intersection d'un cadre et d'une traverse lorsque le bateau navigue vers l'aval, c'est-à-dire pour un impact en position haute sont représentés à la figure 4.5.

Contrairement aux cas précédents, ce type d'impact engendre des conclusions quelque peu différentes.

En effet, contrairement aux impacts étudiés précédemment, les semelles des cadres et les semelles des traverses apportent une résistance supplémentaire importante à la porte. Ces éléments, qui sont directement touchés par l'impact se déforment rapidement et dissipent beaucoup d'énergie. Le bordé et les âmes des traverses ont une influence moindre sur l'enfoncement du bateau et donc sur la résistance de la porte.

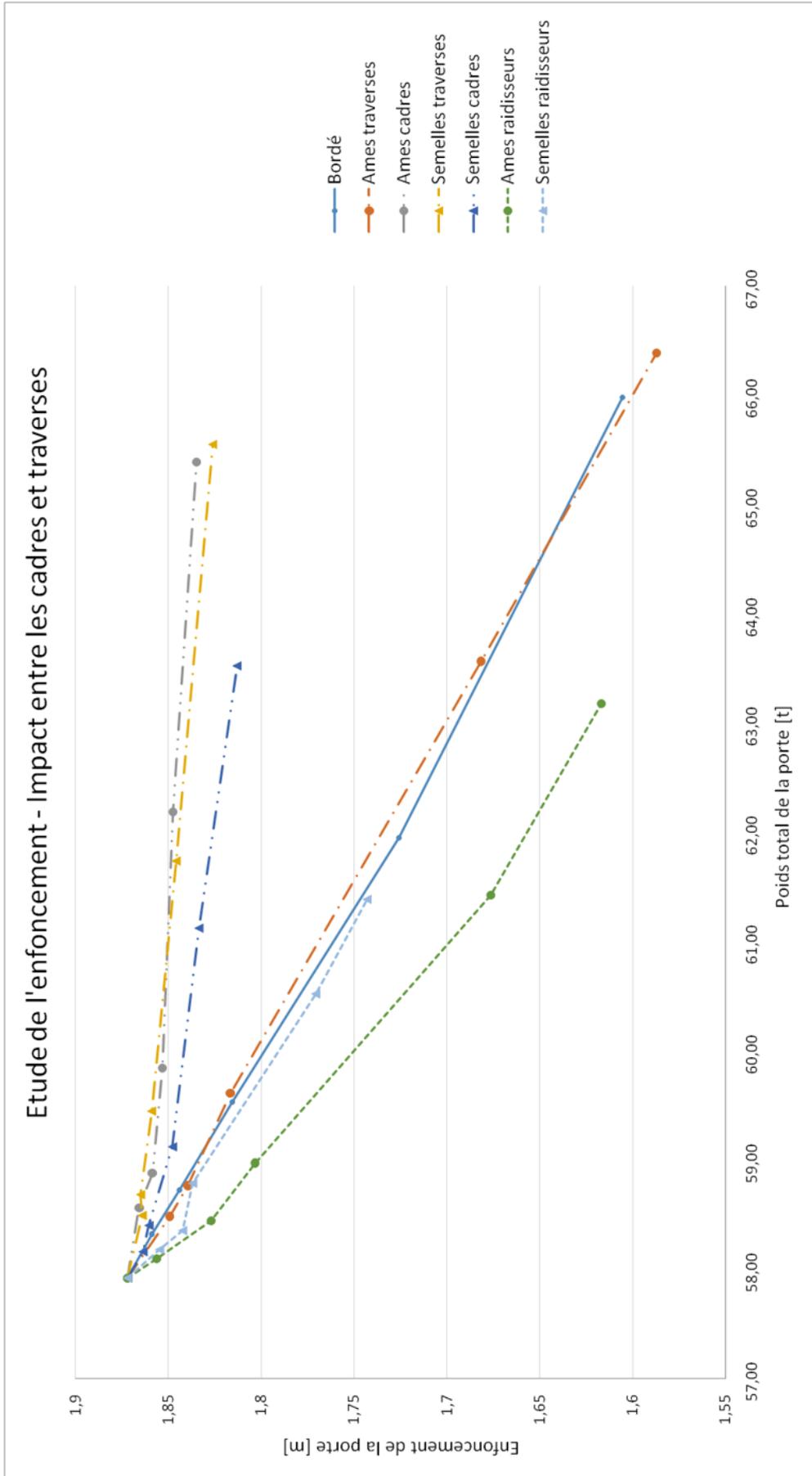


FIGURE 4.2 – Enfoncement maximum du bateau pour un choc entre les cadres et les traverses

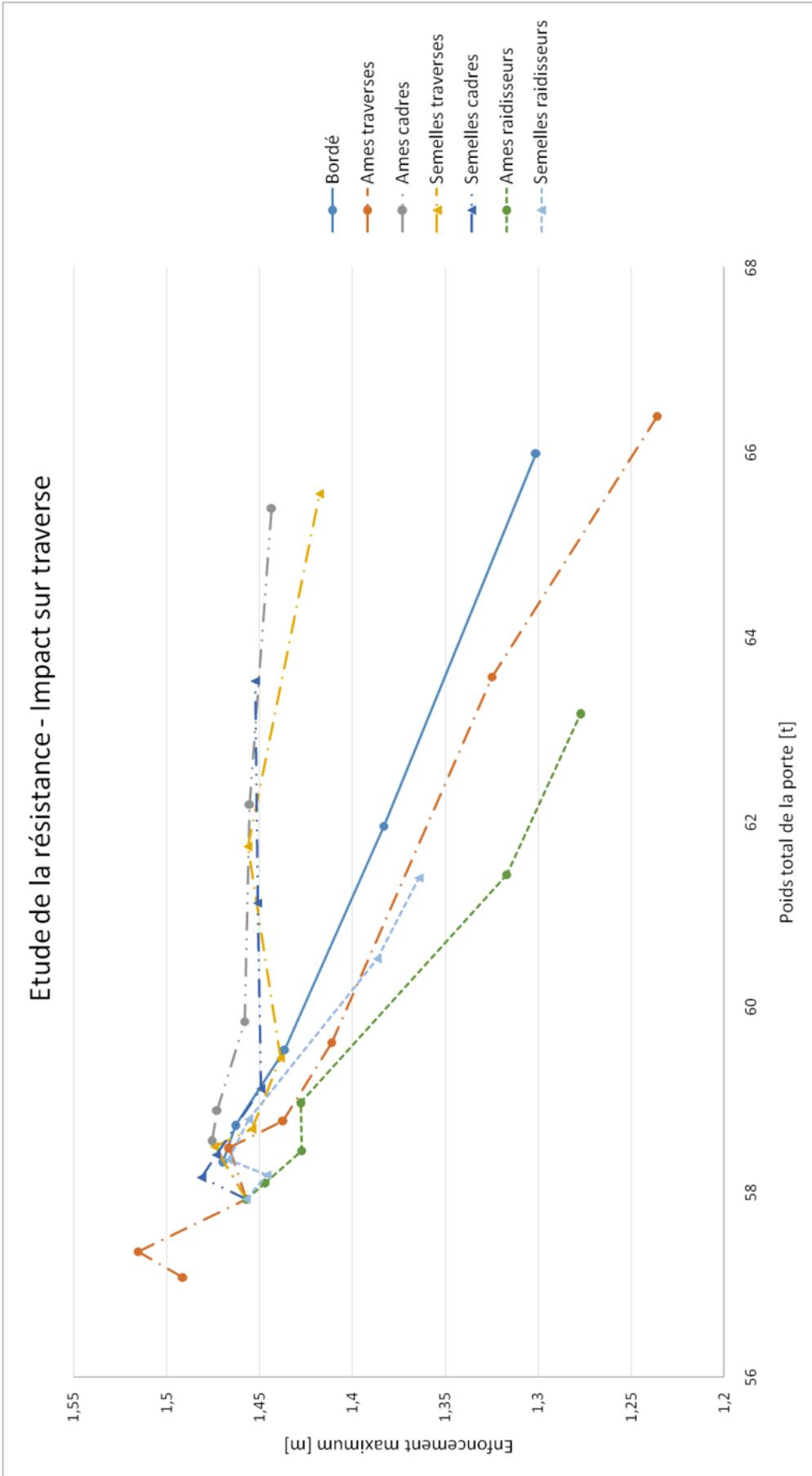


FIGURE 4.3 – Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur une traverse

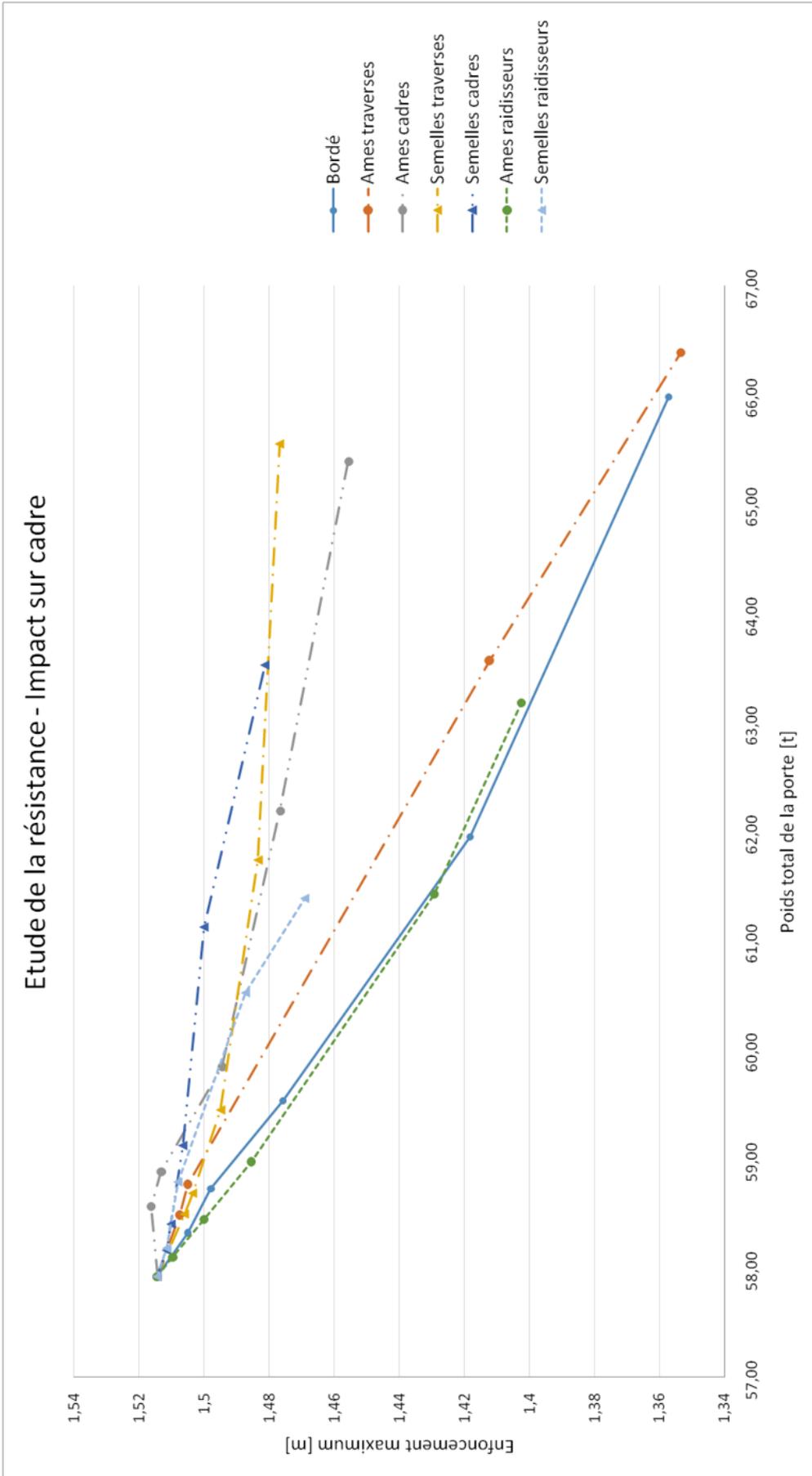


FIGURE 4.4 – Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur un cadre

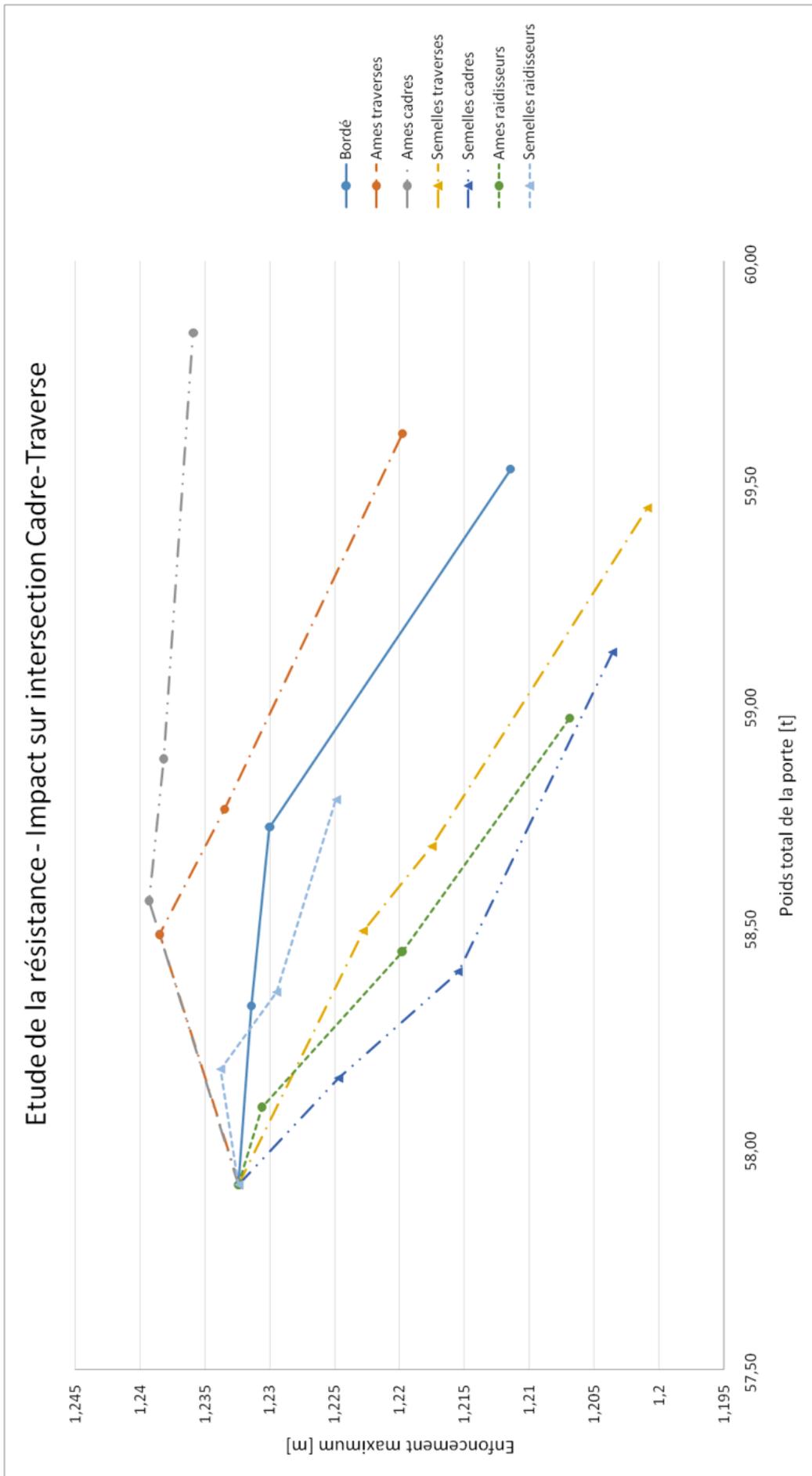


FIGURE 4.5 – Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur l'intersection d'un cadre et d'une traverse

Porte de 26m

Les résultats obtenus avec la porte de 13m concernent une géométrie de porte carrée. Il est intéressant d'étudier l'évolution de l'enfoncement pour une porte de géométrie différente. Nous avons opté pour une porte rectangulaire.

Impact agissant entre les traverses et les cadres

Comme pour le modèle de la porte de 13m, ce point d'impact a lieu directement sur le bordé entre deux cadres et deux traverses lorsque le bateau navigue vers l'aval, c'est-à-dire pour un impact en position haute. Les résultats obtenus sont représentés à la figure 4.6.

Les résultats obtenus sont en accord avec ceux observables dans le cas d'un impact entre les cadres et les traverses sur la porte de 13m. En effet, les raidisseurs suivis du bordé et des âmes des traverses sont les éléments dont une augmentation d'épaisseur engendre une résistance accrue de la porte.

En revanche, les semelles des traverses et les cadres ont une influence moindre sur la résistance de la porte.

Impact agissant sur une traverse

Les résultats obtenus lorsque l'impact se produit au niveau d'une âme d'une traverse lorsque le bateau navigue vers l'aval, c'est-à-dire pour un impact en position haute sont représentés à la figure 4.7

Comme dans le cas de la Porte de 13m ainsi que la porte de 26m pour un impact entre les cadres et les traverses, une augmentation de l'épaisseur des semelles des cadres, des semelles des traverses ainsi que des âmes des cadres n'apporte qu'une faible résistance supplémentaire.

A contrario, une augmentation de l'épaisseur des raidisseurs, des âmes des traverses ou encore du bordé diminue l'enfoncement du bateau dans la porte.

Impact agissant sur un cadre

Les résultats obtenus lorsque l'impact se produit au niveau d'une âme d'un cadre lorsque le bateau navigue vers l'aval, c'est-à-dire pour un impact en position haute sont représentés à la figure 4.8

Comme pour les cas précédents, une augmentation de l'épaisseur des semelles des cadres, des semelles des traverses ainsi que des âmes des cadres n'apporte qu'une faible résistance supplémentaire.

A contrario, une augmentation de l'épaisseur des âmes des traverses ou encore du bordé diminue l'enfoncement du bateau dans la porte. Mais c'est pour une augmentation des raidisseurs que cette variation est la plus importante.

Les résultats obtenus pour les simulations sur cette seconde porte sont bien en accord avec ce qui avait été déduit lors des simulations sur la porte de 13m.

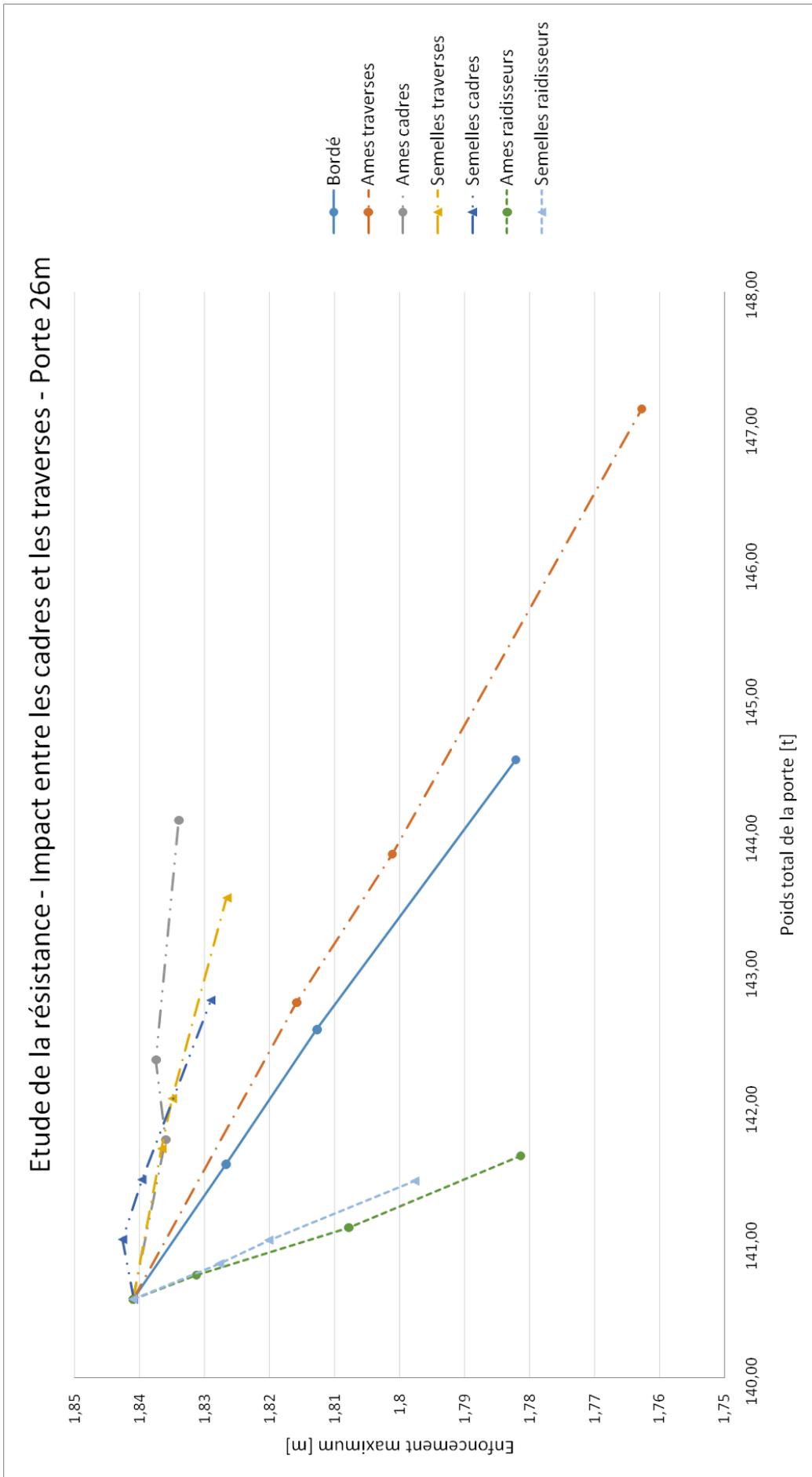


FIGURE 4.6 – Enfoncement maximum du bateau pour un choc entre les cadres et les traverses - Porte de 26m

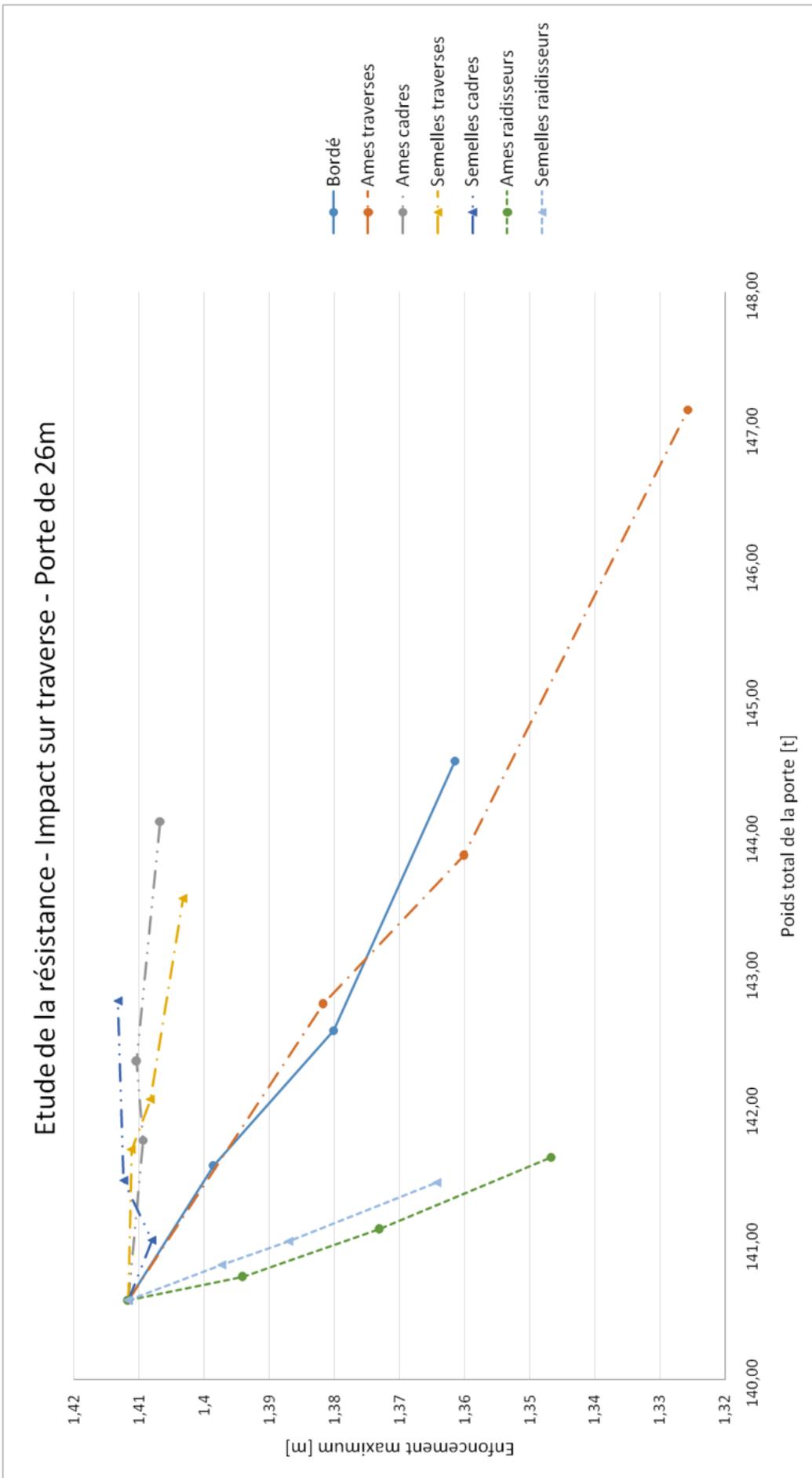


FIGURE 4.7 – Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur une traverse - Porte de 26m

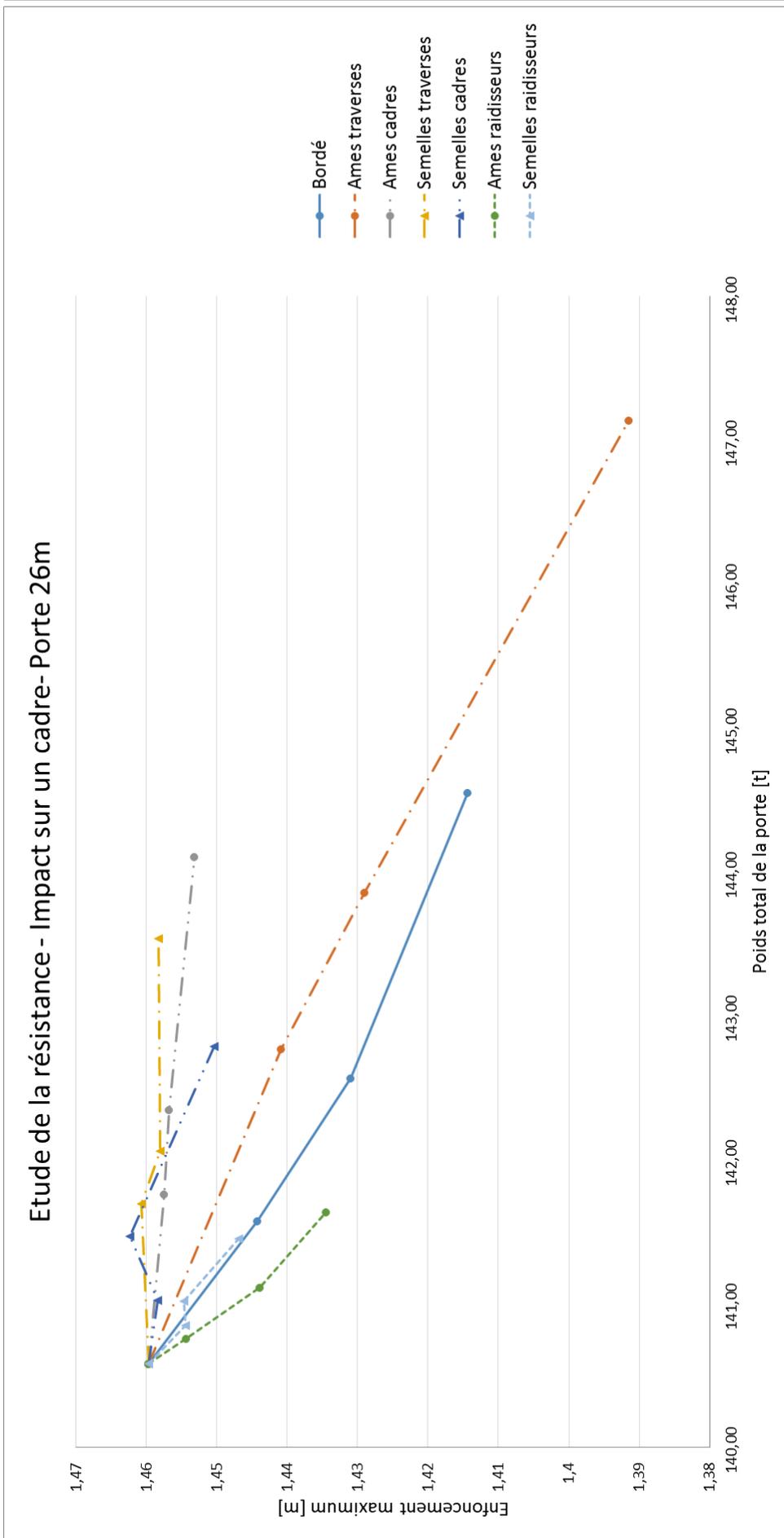


FIGURE 4.8 – Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur un cadre- Porte de 26m

4.2 Enfoncement du bateau lors d'un impact sur la partie basse de la porte

L'étude de l'enfoncement pour un impact en partie supérieure des portes de 13m et de 26m a été menée. Dans cette section, nous allons à présent nous intéresser à un impact survenant en partie inférieure de la porte.

Impact sur une traverse

Les résultats obtenus lorsque l'impact se produit sur une traverse pour un bateau navigant vers l'amont sont représentés à la figure 4.9.

Une augmentation de l'épaisseur des semelles des traverses, des âmes des cadres et des âmes des raidisseurs provoque dans un premier temps une augmentation de l'enfoncement du bateau dans la porte.

Les semelles des cadres et les semelles des raidisseurs ont, pour des petites augmentations, un impact similaire et semble présenter un comportement linéaire.

Pour une petite augmentation de l'épaisseur du bordé la réduction de l'enfoncement est faible. Ensuite, la courbe s'infléchit et l'enfoncement diminue considérablement.

L'augmentation des âmes des traverses a, quant à elle, un impact significatif sur l'enfoncement quelle que soit l'augmentation d'épaisseur.

On notera que dans le cas d'un impact sur une traverse située en partie supérieure de la porte, les résultats obtenus pour des augmentations d'épaisseurs plus importantes montraient également que les âmes des traverses et le bordé avaient un rôle significatif. Cependant, dans ce modèle, les raidisseurs n'apportent que peu de résistance supplémentaire à la porte, contrairement au cas d'un impact en partie haute. Cela peut s'expliquer par l'augmentation de la densité des éléments tels que les traverses dans la zone d'impact.

Impact sur un cadre

Les résultats obtenus pour un impact sur un cadre pour un bateau navigant vers l'amont sont représentés à la figure 4.10.

Les éléments apportant une résistance plus importante sont les semelles des cadres et les semelles des traverses. On voit donc que les semelles des éléments directement impactés pour ce genre d'impact ont un rôle considérable dans la résistance de la porte.

Une augmentation de l'épaisseur de l'âme de traverses ainsi que du bordé augmente, une fois de plus, la résistance de la porte.

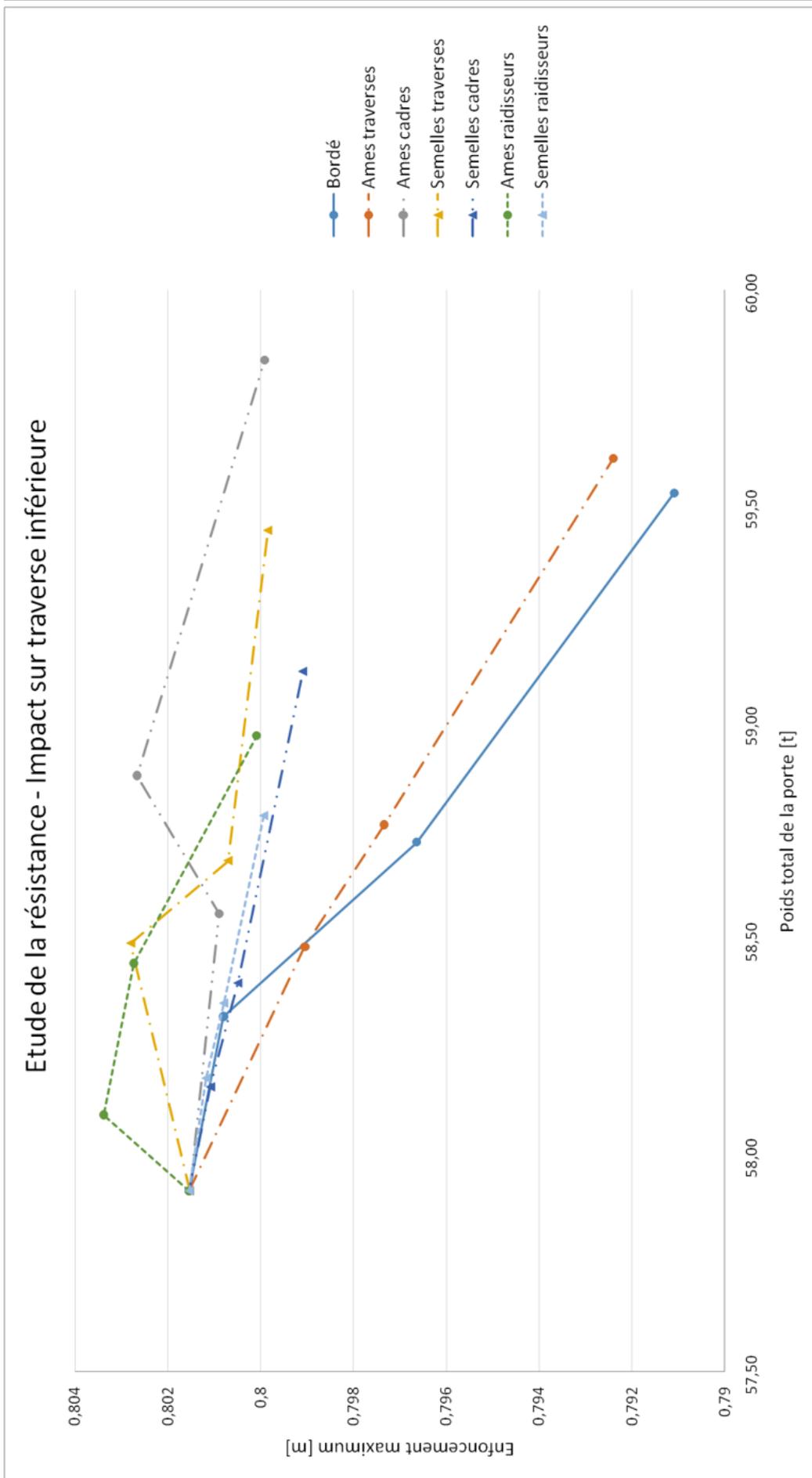


FIGURE 4.9 – Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur une traverse inférieure

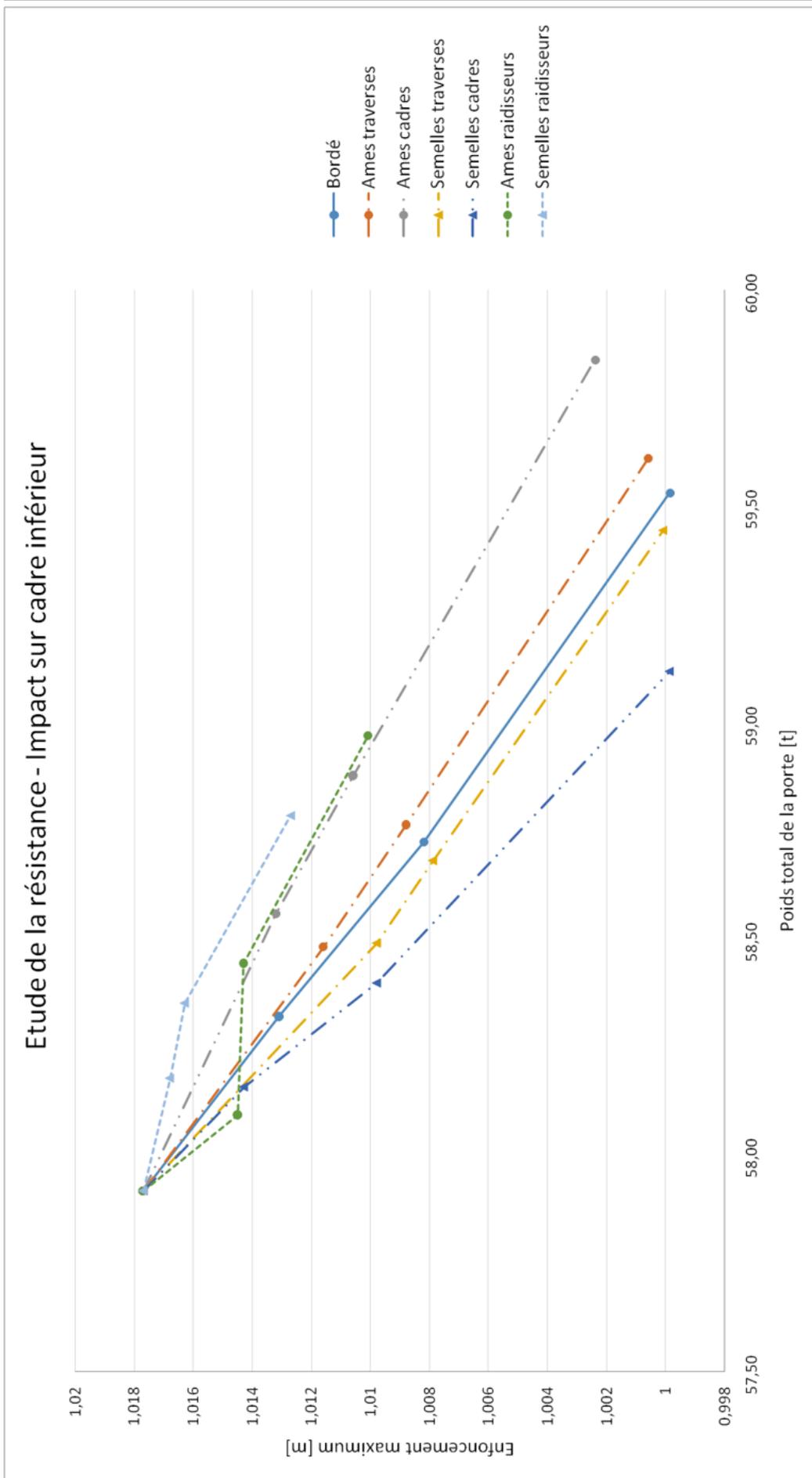


FIGURE 4.10 – Enfoncement maximum du bateau pour un choc sur un cadre inférieur

4.3 Comparaison des déformations

Les déformations observées pour un impact en position haute ou en position basse sont sensiblement différentes. Nous allons donc comparer ces déformations dans le cas d'un impact sur traverse pour les modèles de référence.

Lors d'un impact en partie supérieure, les déformations observées dans la porte sont considérables et s'étendent sur toute sa hauteur.

Lors d'un impact en partie inférieure, les déformations sont plus modérées et ne semblent affecter que la zone directement impactée.

Cette différence de déformations s'explique par un raidissage plus important dans la partie inférieure de la porte. En effet, en partie inférieure, les traverses sont moins espacées qu'en partie supérieure.

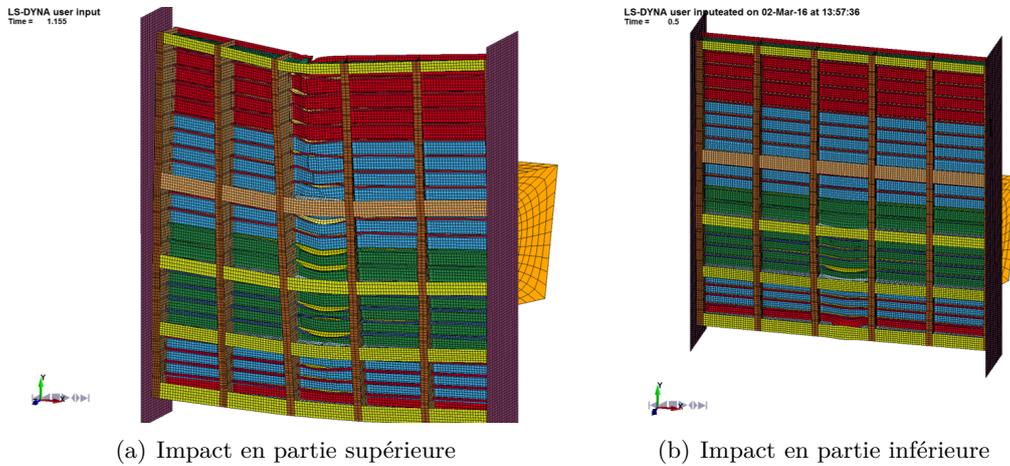
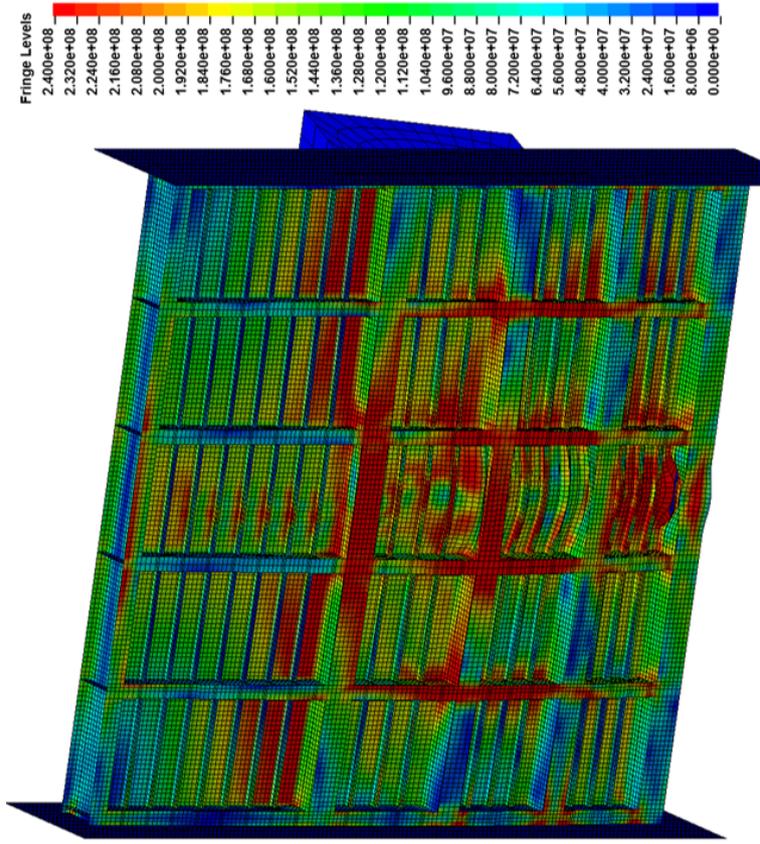


FIGURE 4.11 – Déformations

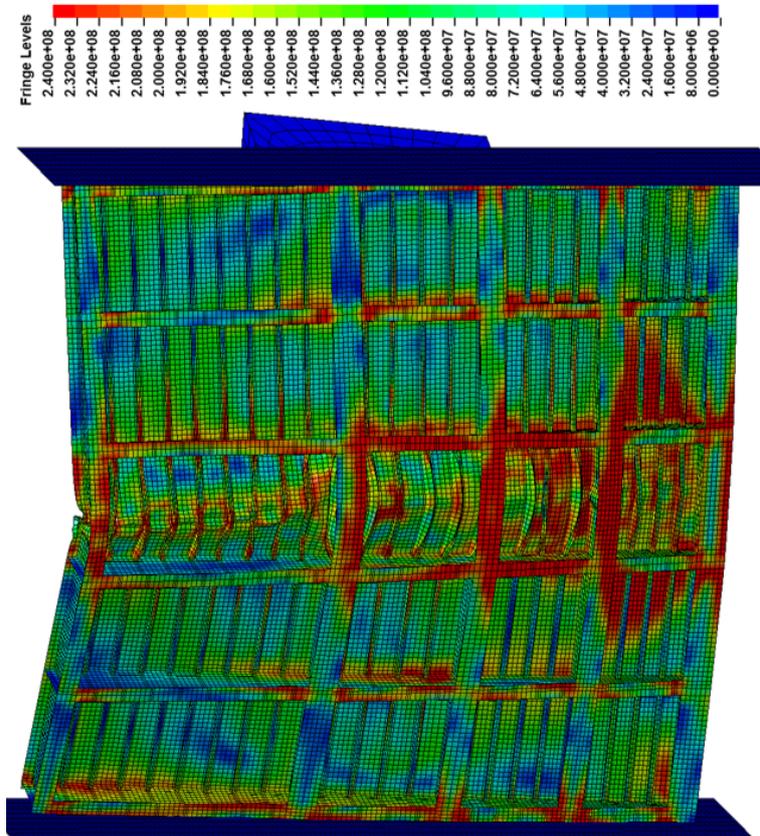
Les contraintes de Von Mises se répartissent différemment lors d'un impact en partie inférieure ou supérieure.

Pour un impact en partie supérieure, les contraintes maximales sont localisées au niveau de la deuxième traverse et sur la partie centrale de la porte.

Pour un impact en partie inférieure, les contraintes maximales se répartissent de façon plus homogène sur la largeur de la porte. De plus, le bordé situé au-dessus de la quatrième traverse reprend une contrainte importante.



(b) Impact en partie inférieure



(a) Impact en partie supérieure

FIGURE 4.12 – Contraintes de Von Mises

Les éléments de raidissage de la porte vont à présent être analysés plus en détails.

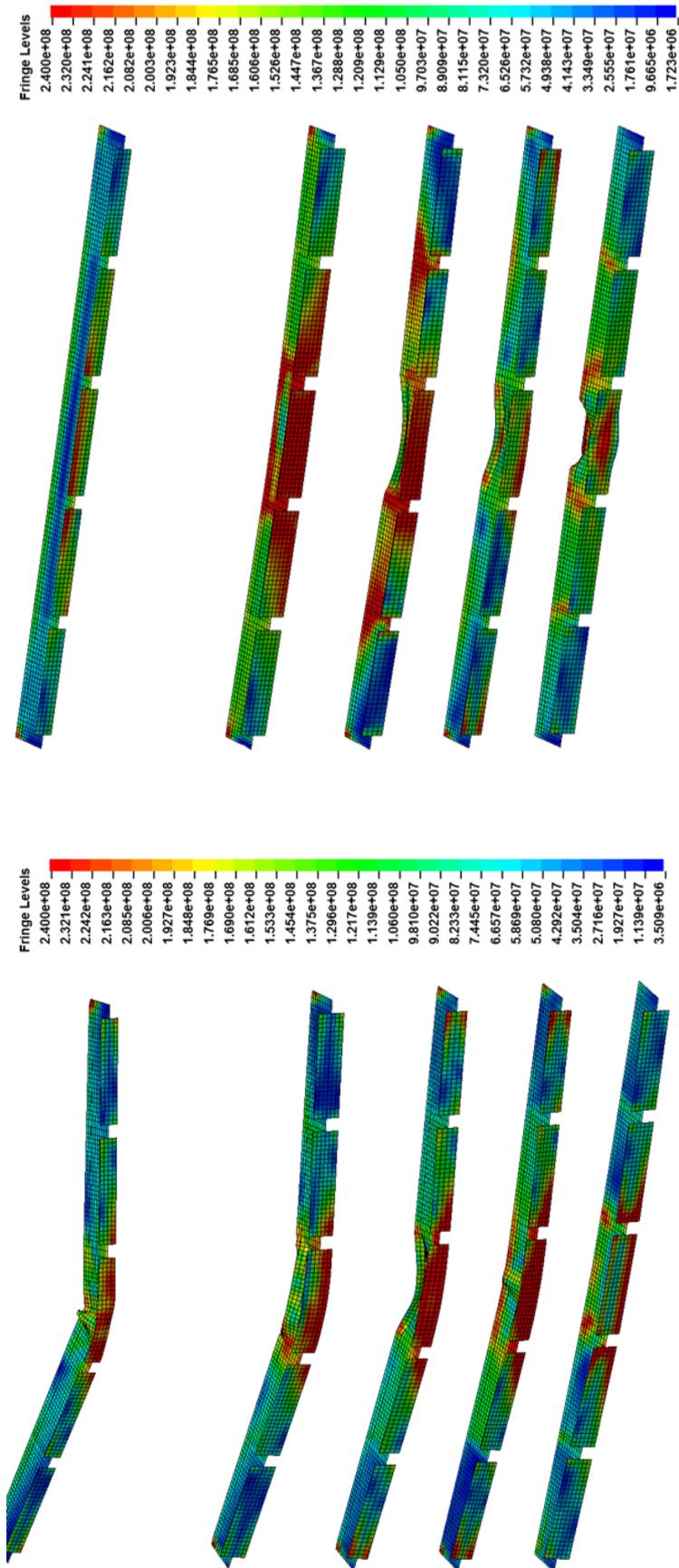
Pour un impact en partie haute (figure 4.13a), les deux traverses inférieures ne sont quasiment pas endommagées. Les traverses supérieures, elles, se déforment considérablement. Les contraintes maximales sont observables dans les semelles des traverses et sont concentrées sur la largeur de l'impact.

Pour un impact en partie inférieure de la porte (figure 4.13b), les contraintes se concentrent au droit des quatre traverses inférieures. Les déformations les plus importantes sont observées dans l'âme de la troisième traverse, qui est la zone d'impact du bateau. Les semelles des deux traverses inférieures subissent également des déformations, mais celles-ci sont moins importantes. La traverse supérieure quant à elle ne reprend quasiment pas d'efforts et ne se déforme que très peu.

Cette tendance s'explique par un mode global localisé sur les quatre traverses inférieures lors d'un impact en partie inférieure. La hauteur des cadres séparant les traverses est variable et devient important entre la 4^e et la 5^e traverse. La formation de rotules plastiques au dessus de la quatrième traverse empêche une bonne transmission des efforts. La dernière traverse ne collabore donc pas à la reprise de l'effort autant que les autres traverses.

C'est dans les raidisseurs que les déformations varient le plus (figure 4.14). En effet, lors d'un impact en position haute, les raidisseurs situés entre les traverses 2 et 5 se déforment soit 16 raidisseurs alors qu'en position basse, seuls les raidisseurs situés entre les traverses 2 et 3 participent à la dissipation d'énergie, soit 4 raidisseurs seulement.

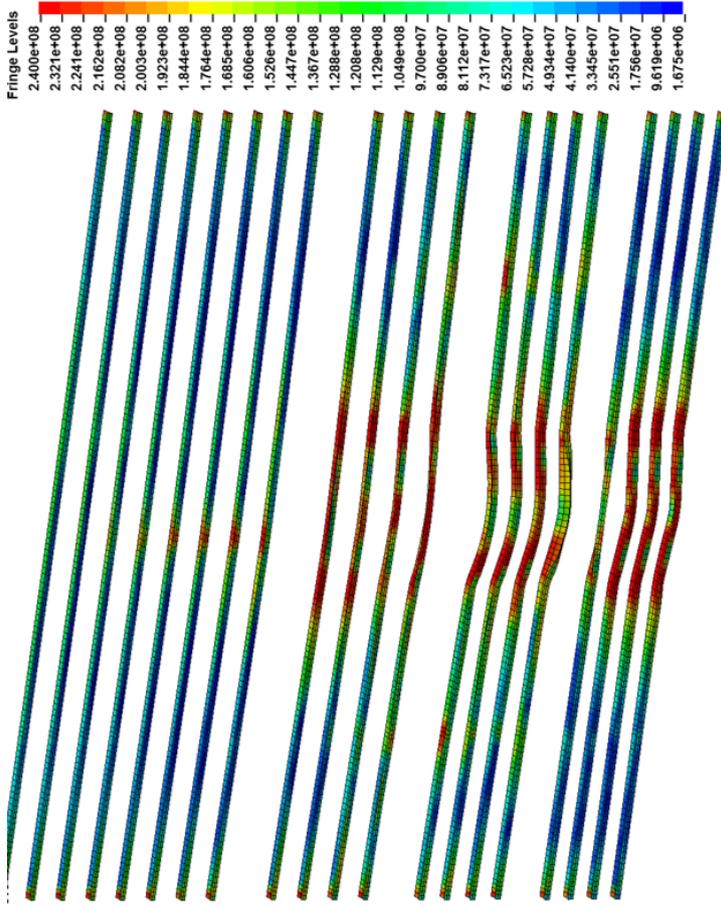
La formation de rotules plastiques lors d'un impact en partie basse est également visible dans le cas des raidisseurs. En effet sur le figure 4.14b, les raidisseurs en partie haute de la porte ne contribuent pas à la reprise de l'effort.



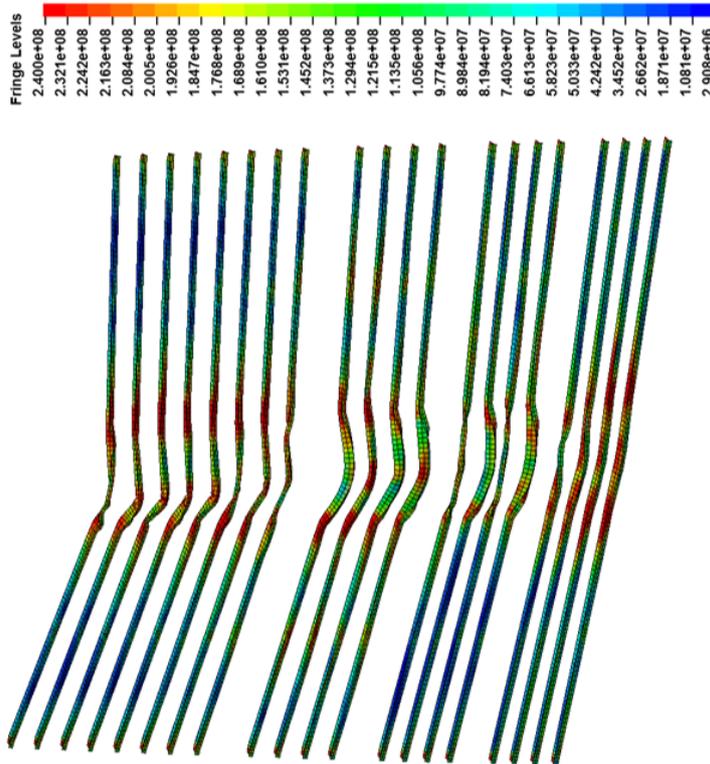
(a) Impact en partie supérieure

(b) Impact en partie inférieure

FIGURE 4.13 – Contraintes de Von Mises dans les traverses



(b) Impact en partie inférieure



(a) Impact en partie supérieure

FIGURE 4.14 – Contraintes de Von Mises

Concernant l'évolution de la vitesse du bateau, lors d'un impact en position basse, celle-ci diminue considérablement et ensuite oscille autour de $0m/s$. En effet, les éléments de raidissage beaucoup plus dense dans cette région amortissent l'impacteur de façon considérable. Cela explique également que les déformations sont réduites lors d'un impact dans cette zone.

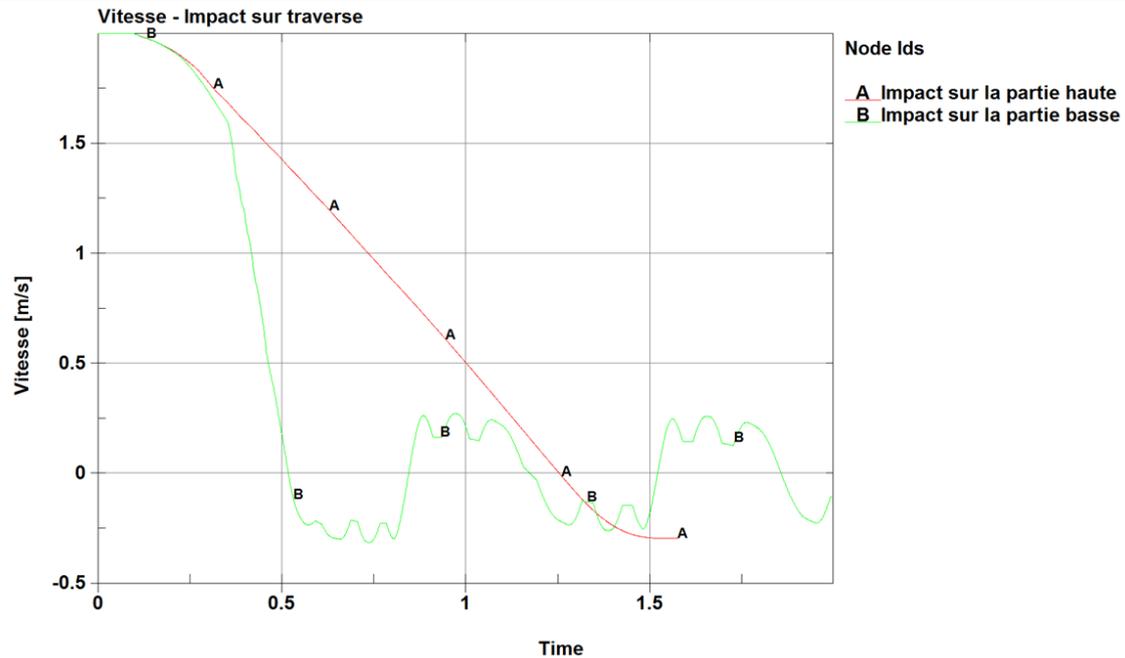


FIGURE 4.15 – Comparaison des vitesses

Nous constatons donc que les déformations et reprises des efforts lors d'un impact en position haute et en position basse diffèrent complètement.

Cela s'explique par la densité d'élément de raidissage présent lors d'un impact en partie basse de la porte. En effet, plus d'éléments participent à la reprise des efforts et la vitesse décroît plus rapidement que lors d'un impact en position haute.

4.4 Comparaison des efforts dans la porte

Lors de l'impact du bateau sur la porte, des efforts considérables sont transmis. Il convient donc de comparer l'évolution de ces efforts dans la porte ainsi que les réactions d'appuis.

4.4.1 Impact entre les cadres et les traverses

Pour chaque simulation, il est possible de connaître l'évolution de l'effort transmis par le bateau à la porte.

Sur le diagramme 4.16, nous pouvons observer l'évolution de l'effort pour chacun des bordés. En effet, nous avons défini trois épaisseurs de bordé. Les courbes A, B et C représentent donc respectivement l'effort dans le bordé de $10mm$, de $11mm$ et de $12mm$ en

fonction du temps.

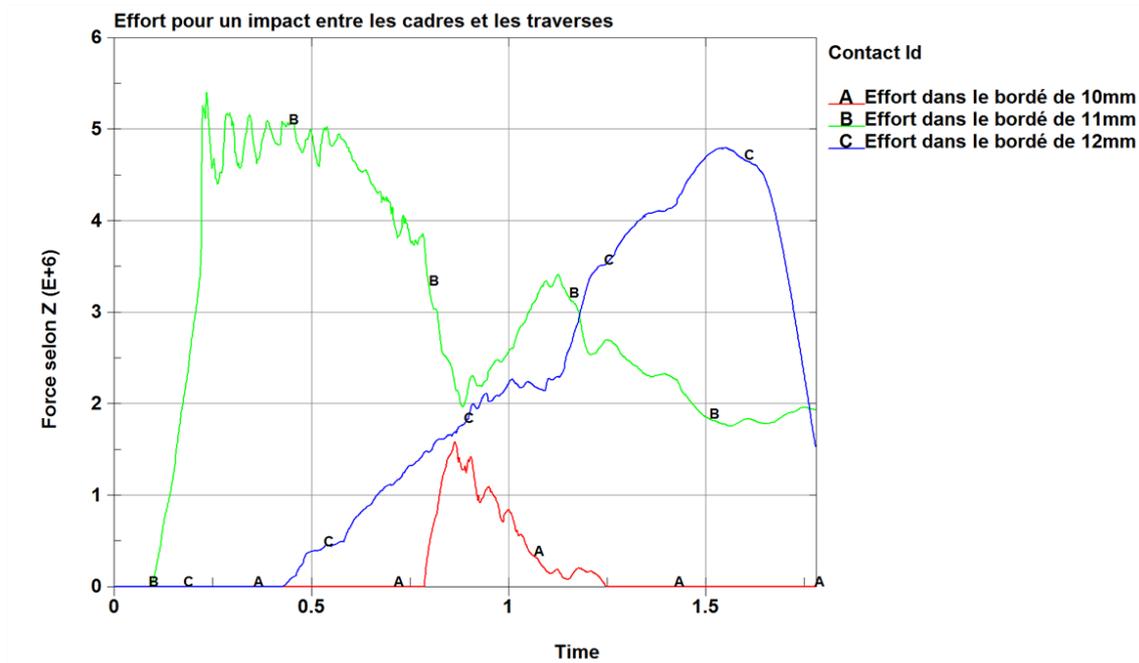


FIGURE 4.16 – Efforts transmis par le bateau pour un impact entre les cadres et les traverses

En sommant ces trois courbes, il est ensuite possible de connaître, pour chaque modèle, l'effort maximal transmis à la porte en fonction de son poids. Le graphique 4.17 représente l'évolution de l'effort pour la porte de 13m lors d'un impact entre les cadres et les traverses.

Globalement l'effort maximum dans la porte augmente excepté pour une augmentation des semelles des raidisseurs ainsi que pour une augmentation de 50% des âmes des traverses.

Pour ces derniers modèles, l'effort moyen va alors être étudié. L'évolution de l'effort pour un impact agissant entre les cadres et les traverses pour une augmentation de l'épaisseur des âmes des traverses et des semelles des raidisseurs sont représentés respectivement aux figures 4.18 et 4.19.

Les moyennes des efforts sont reprises dans les tableaux ci-dessous :

Modèle	Référence	30 - +50% âmes des traverses
Moyenne	$4,73 \times 10^6 N$	$5,31 \times 10^6 N$

TABLE 4.1 – Moyenne de l'effort - Augmentation de l'épaisseur des âmes des traverses

Modèle	Référence	35 - +125% semelles des raidisseurs	28 - +200% semelles des raidisseurs
Moyenne	$4,73 \times 10^6 N$	$5,10 \times 10^6 N$	$5,19 \times 10^6 N$

TABLE 4.2 – Moyenne de l'effort - Augmentation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs

Dans les deux cas, une augmentation de l'épaisseur des éléments provoque une augmentation de la reprise de l'effort moyen.

Lors d'une augmentation des âmes des traverses, une augmentation de 12% de la reprise de l'effort moyen est observable. Cette augmentation est de 6% lors d'une augmentation des semelles des raidisseurs.

Une augmentation de 50% des âmes des traverses ainsi que des semelles des raidisseurs provoque donc une meilleure répartition des efforts dans la porte. En effet, la structure reprend des efforts moyens plus importants alors que les efforts maximums sont diminués. Cela aura également comme conséquence de diminuer les réactions d'appuis et soulagera donc les articulations de la porte qui représentent souvent un point faible lors d'un impact.

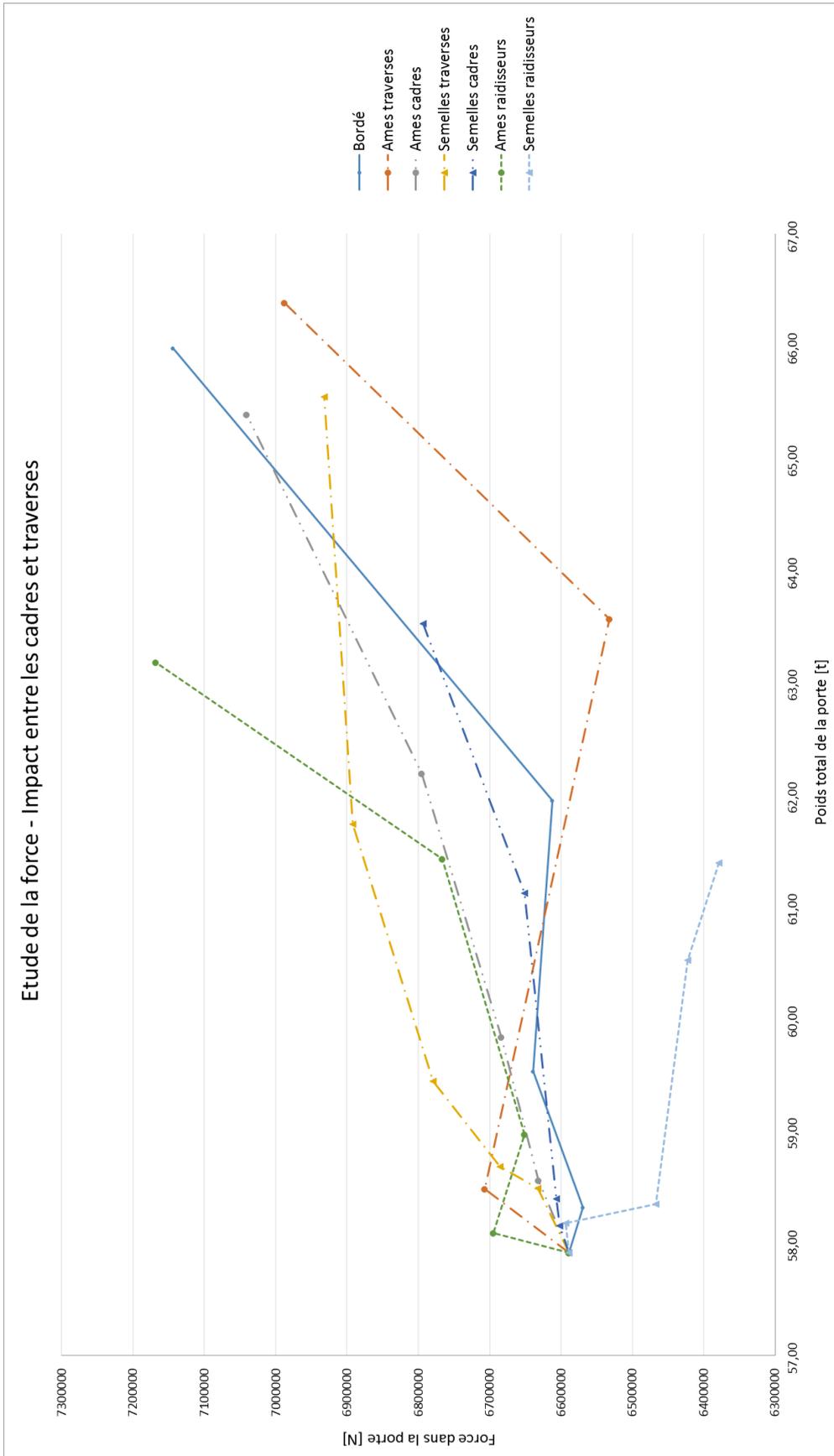


FIGURE 4.17 – Évolution de l'effort pour un impact agissant entre les cadres et les traverses

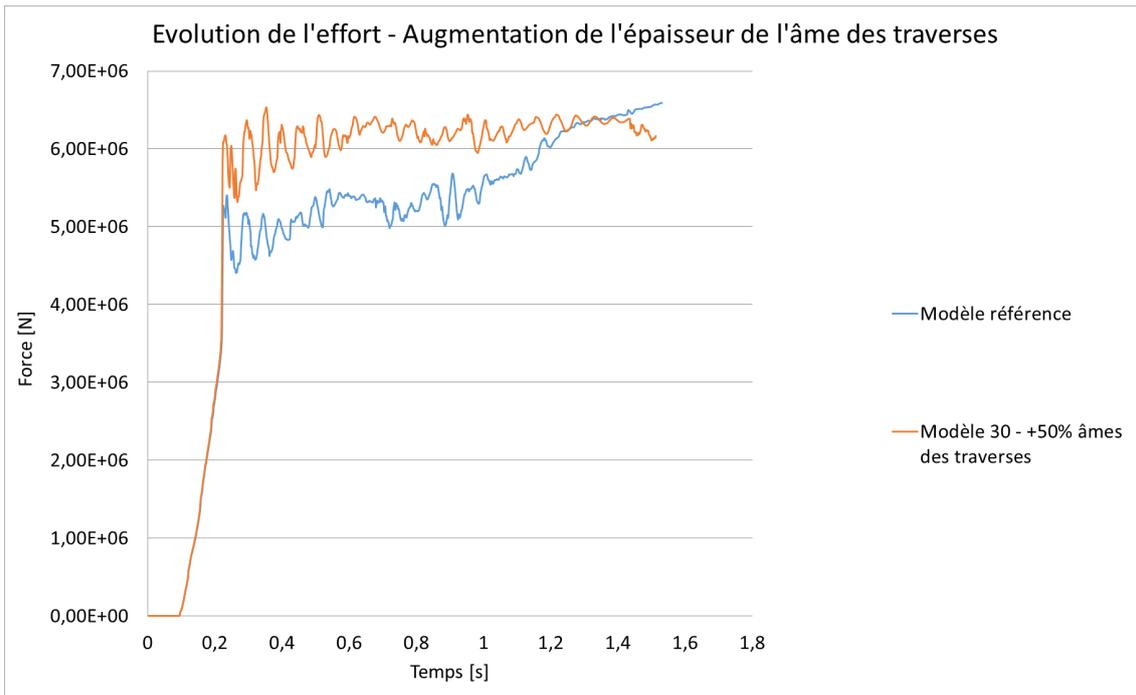


FIGURE 4.18 – Évolution de l’effort pour un impact agissant entre les cadres et les traverses avec augmentation de l’épaisseur des âmes des traverses

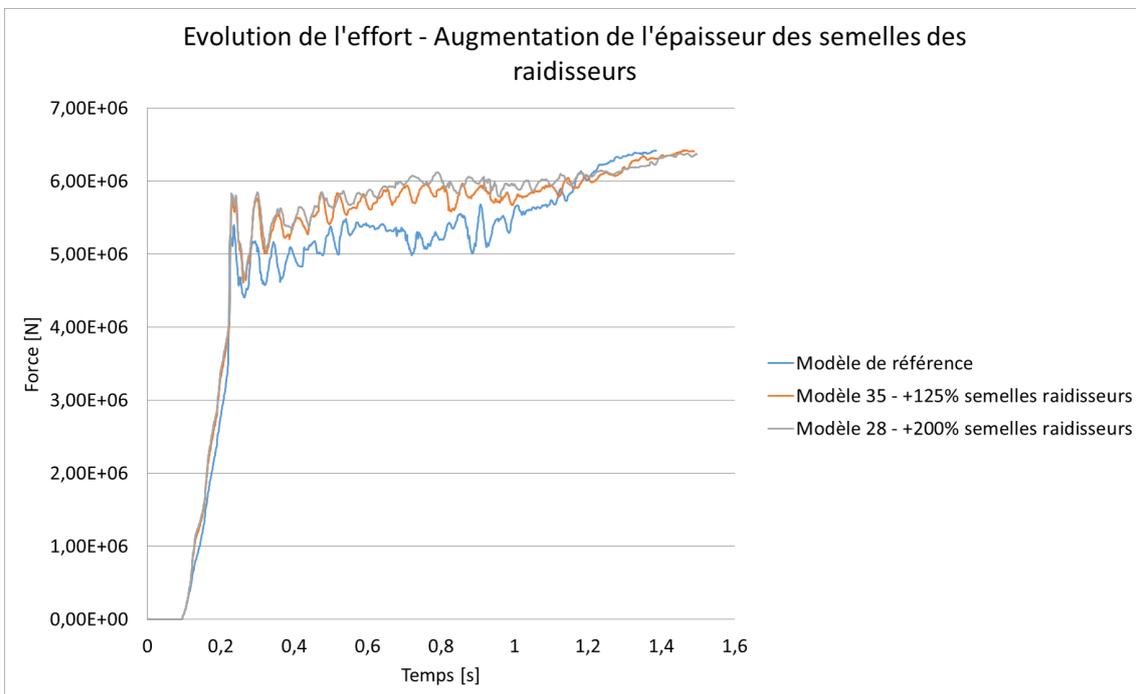


FIGURE 4.19 – Efforts en fonction du poids pour un impact agissant entre les cadres et les traverses avec augmentation de l’épaisseur des semelles des raidisseurs

4.4.2 Impact sur une traverse

L'effort pour un impact sur une traverse située en partie supérieure de la porte a également été analysé. L'évolution de l'effort maximum transmis à la porte en fonction de son poids est représentée à la figure 4.20.

Comme dans le cas d'un impact entre les cadres et les traverses, l'effort maximum repris par la porte augmente globalement pour une augmentation d'épaisseur du bordé, des traverses et des raidisseurs. Cet effort reste cependant relativement constant dans le cas d'une augmentation d'épaisseur des cadres.

Lors d'un épaississement de 50% de la semelle des âmes des traverses, la croissance de l'effort maximum repris par la porte s'arrête comme dans le cas d'un impact entre les cadres et les traverses. Nous pouvons cependant observer sur la figure 4.21 que l'effort moyen repris par la porte augmente.

L'effort maximum repris par la porte lors d'une augmentation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs croit dans un premier temps pour ensuite se stabiliser. Les efforts moyens pour ces cas sont représentés à la figure 4.22.

Une croissance de l'épaisseur des semelles des cadres semble être favorable concernant la reprise de l'effort maximum. Cependant, cela n'a que peu d'influence sur l'enfoncement du navire dans la porte. De plus, l'effort moyen repris par la porte n'augmente que très peu.

Le tableau ci-dessous reprend les variations d'efforts moyens dans la porte en fonction du poids total de la porte :

Modèle	Effort moyen M[J]	ΔE par rapport au modèle de référence	Poids [t]
Référence	6,21	/	57,92
30 - +50% âmes traverses	6,82	10%	63,56
35 - +125% semelles raidisseurs	6,57	6%	60,52
28 - +200% semelles raidisseurs	6,77	9%	61,39
26 - +100% semelles cadres	6,42	3%	63,52
24 - +50% âmes cadres	6,35	2%	65,39

TABLE 4.3 – Définition des différents modèles

Selon le tableau 4.3 et les graphiques 4.23 et 4.24, il n'est pas intéressant d'augmenter l'épaisseur des cadres qui n'ont qu'une influence faible sur la reprise de l'effort moyen. Par contre, une augmentation de 50% des âmes des traverses et de 200% des semelles des raidisseurs, ont une influence non négligeable sur la reprise de l'effort moyen.

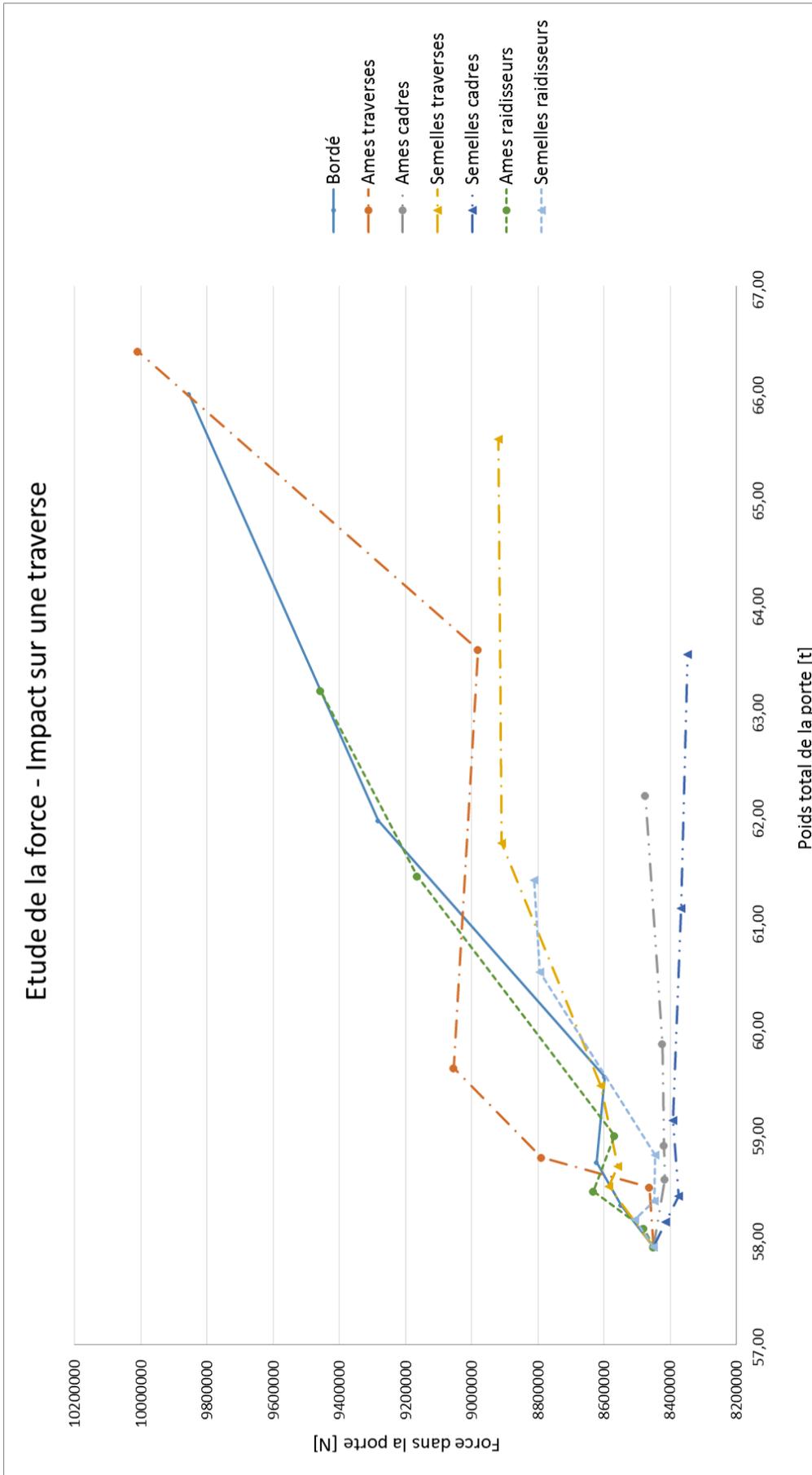


FIGURE 4.20 – Évolution de l'effort pour un impact agissant sur une traverse

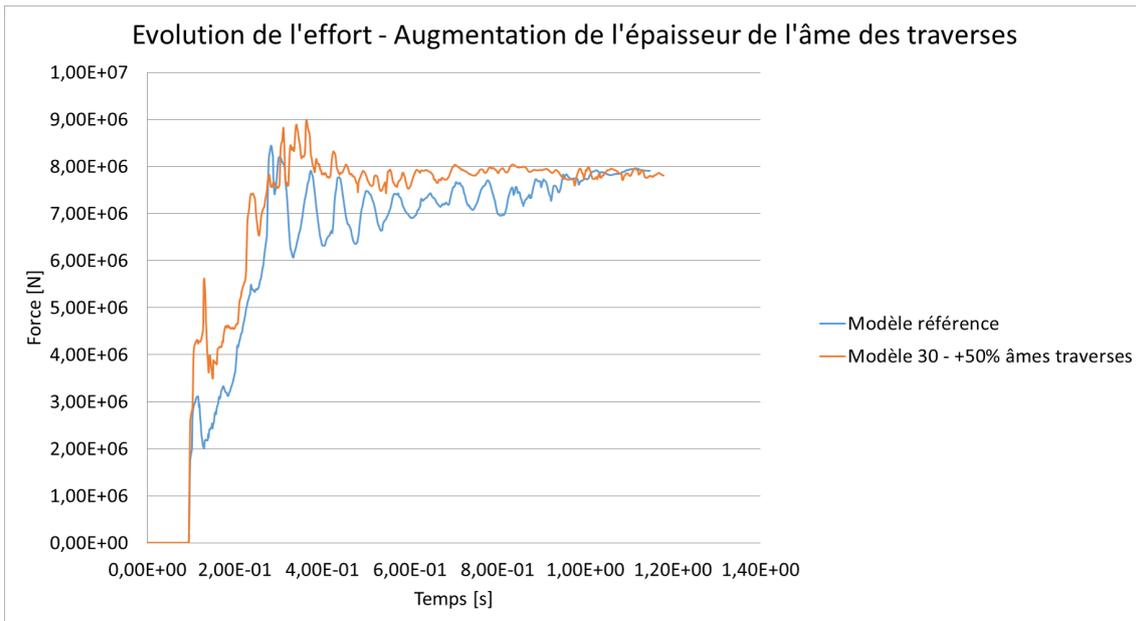


FIGURE 4.21 – Évolution de l'effort pour un impact agissant sur une traverse avec augmentation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs

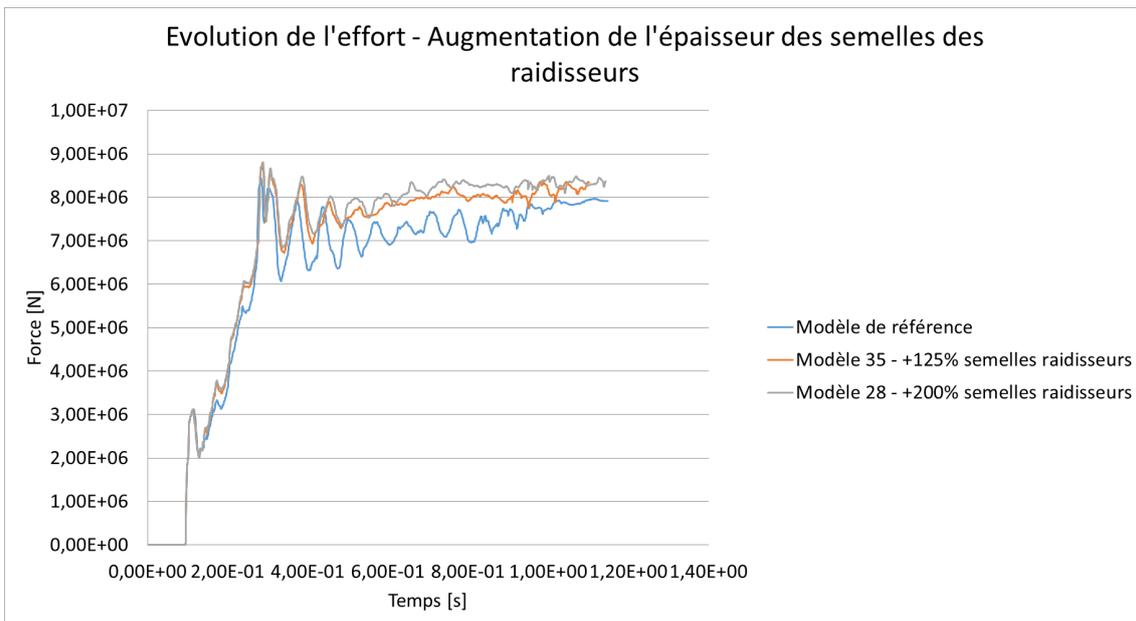


FIGURE 4.22 – Efforts en fonction du poids pour un impact agissant sur une traverse avec augmentation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs

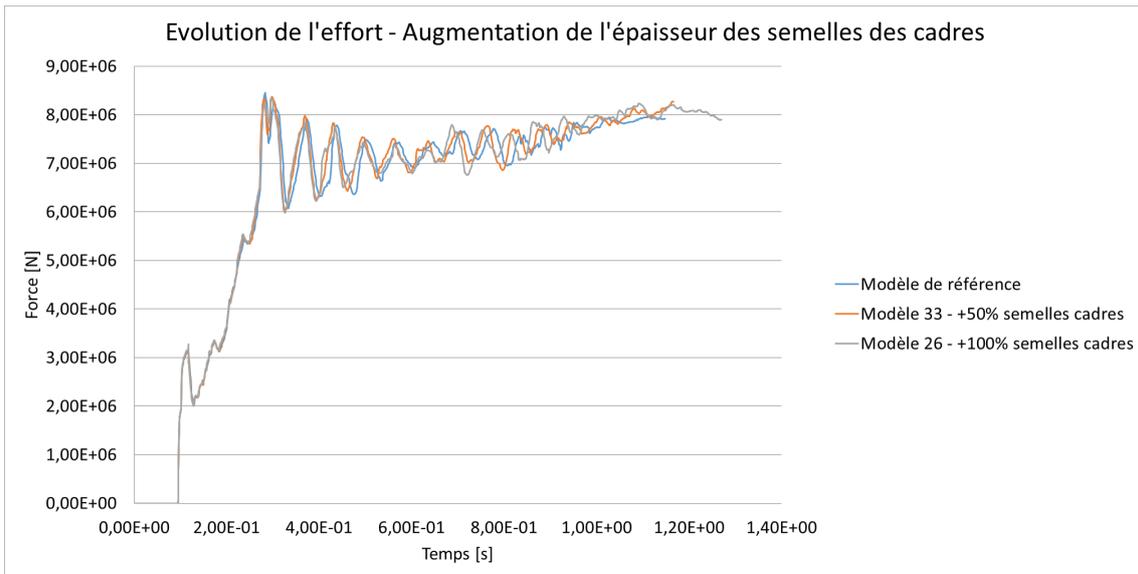


FIGURE 4.23 – Évolution de l'effort pour un impact agissant sur une traverse avec augmentation de l'épaisseur des semelles des cadres

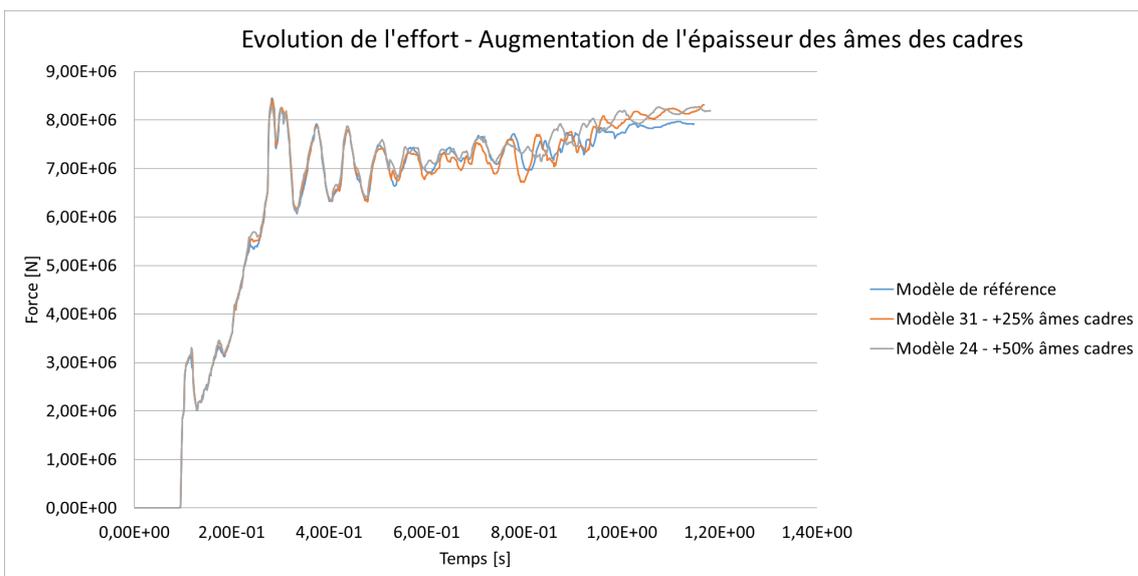


FIGURE 4.24 – Efforts en fonction du poids pour un impact agissant sur une traverse avec augmentation de l'épaisseur des âmes des cadres

4.5 Résultats

Les résultats obtenus ont été établis sous les hypothèses suivantes :

- Une géométrie fixe des éléments de raidissage de la porte
- Un bateau à proue arrondie de 4000t et dont la vitesse est de 2m/s.

4.5.1 Enfoucement

Les résultats obtenus pour la porte de 13m et pour la porte de 26m nous permettent de tirer des conclusions similaires.

Impact en partie supérieure

Pour un impact en position haute de la porte, les éléments de types cadres ou semelles des traverses n'ont qu'une influence moindre sur la résistance de la porte.

Les éléments constitutifs à renforcer sont les raidisseurs, le bordé ou les âmes des traverses. En effet, c'est pour une augmentation d'épaisseur de ces types d'éléments que l'enfoncement d'un navire dans la porte diminue considérablement.

Impact en partie inférieure

Lors d'un impact en position basse de la porte, l'augmentation de section des raidisseurs n'a qu'une influence faible sur la résistance de la porte. De plus, leur influence est difficile à prédire. Cela s'explique par l'espacement réduit des traverses et la densité des éléments de raidissage dans cette zone qui limitent fortement les déformations.

Comme pour un impact en position haute, une augmentation de l'épaisseur du bordé et des âmes des traverses apporte également une résistance supplémentaire importante de la porte. Les cadres et les semelles des traverses ont également une influence faible sur la résistance de la porte.

4.5.2 Effort

Une augmentation de l'épaisseur des différents éléments engendre globalement une augmentation de la reprise de l'effort maximum. Cette constatation n'est cependant pas vraie lors d'une augmentation de 50% de l'âme des traverses ou lors d'une augmentation des semelles des raidisseurs pour un impact entre les cadres et les traverses.

Dans ces derniers modèles, pour un impact agissant entre les cadres et les traverses, l'effort maximum diminue alors que l'effort moyen augmente. Cela s'explique par une meilleure répartition de l'effort dans la porte. Les efforts maximums ainsi que les réactions d'appuis sont alors réduits.

Ce chapitre m'a donc permis de mettre en évidence l'importance des raidisseurs ainsi que des âmes des traverses sur la résistance de la porte. En effet, ces éléments permettent d'une part de diminuer l'enfoncement du bateau dans la porte mais également de diminuer l'effort maximum tout en augmentant l'effort moyen repris par la porte. Cette diminution de l'effort maximum repris par la porte est bénéfique non seulement pour la structure mais également pour les articulations.

Chapitre 5

Analyse critique des résultats

Une analyse critique des résultats obtenus va maintenant être menée car les résultats obtenus lors des simulations ne reflètent pas toujours le comportement attendu. En effet, lors de l'impact sur une traverse de la partie supérieure de la porte par exemple, l'enfoncement du bateau dans la porte augmente pour une croissance de l'épaisseur de certains éléments.

Des pistes d'explications vont donc être émises afin de tenter d'expliquer ce comportement et afin de s'assurer qu'il ne provient pas d'une erreur de modélisation ou lors de la simulation. Les résultats qui sont comparés concernant un point d'impact et une porte identique, seule l'épaisseur des éléments constitutifs varie.

Pour ce faire, trois pistes d'explications ont été émises et analysées pour chacun des modèles établis. :

- Un cheminement différents des contraintes dans les différents éléments
- Une énergie de Hourglass trop importante
- Une variation de l'énergie interne

5.1 Contraintes de Von Mises

Les contraintes de Von Mises sont définies comme la somme des contraintes normales et de cisaillement dans 3 directions. Sa formule est :

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau^2} \quad (5.1)$$

Les contraintes de comparaison de Von Mises pour la porte de 13m lors d'un impact entre les cadres et les traverses sont présentées à la figure 5.1.

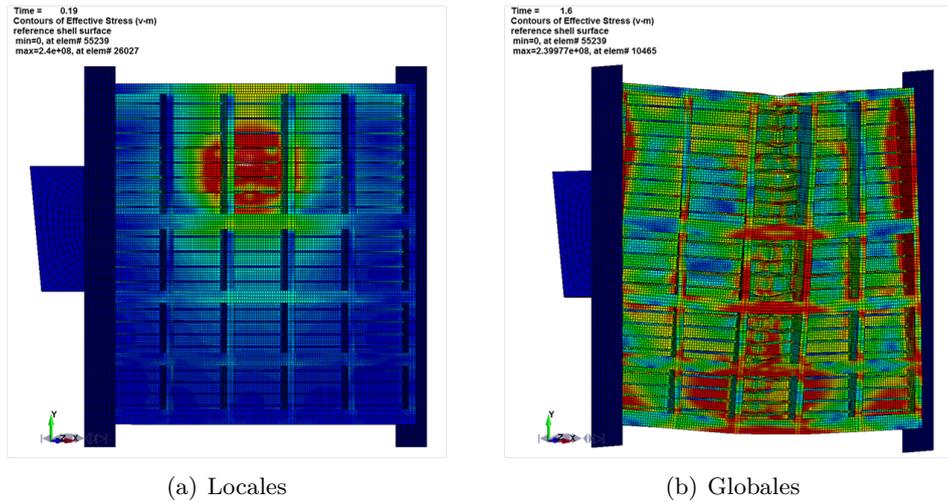


FIGURE 5.1 – Contraintes de Von Mises

Comme dit précédemment, il existe deux processus de déformation dans la porte ; le mode local et le mode global.

Au début de la collision, pour de petits enfoncements et donc de petites déformations, les dommages causés à la porte sont localisés dans une zone réduite proche du point de contact. C'est le mode de déformation local qui peut être observé sur la figure 5.1a. Cette région est soumise à des déformations plastiques importantes.

Lorsque l'enfoncement devient plus important, un mouvement élasto-plastique de la porte entière se produit simultanément aux déformations locales. Ces déformations globales peuvent être observées à la figure 5.1b.

Les contraintes sont maximales dans les âmes des traverses ainsi que dans le bordé. Cette contrainte a une valeur de $240MPa$ qui représente la limite élastique de la porte. Notons que cette contrainte est induite uniquement par le choc du bateau. Il conviendrait de tenir également compte des autres cas de chargement tels que la pression hydrostatique.

Les contraintes sont également élevées dans la partie inférieure de la porte ainsi que dans les âmes des cadres extérieurs.

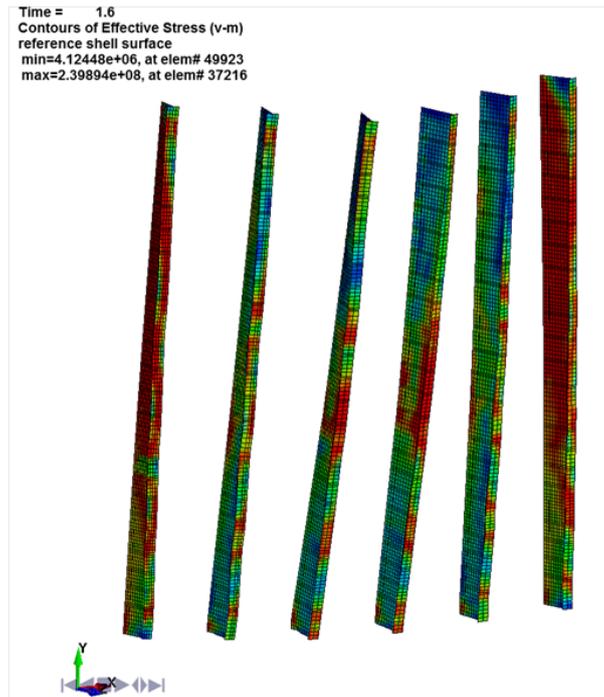


FIGURE 5.2 – Déformations et contraintes dans les cadres

Suite à l'impact du navire, il y a formation de rotules plastiques, particulièrement visibles dans l'âme de la traverse supérieure.

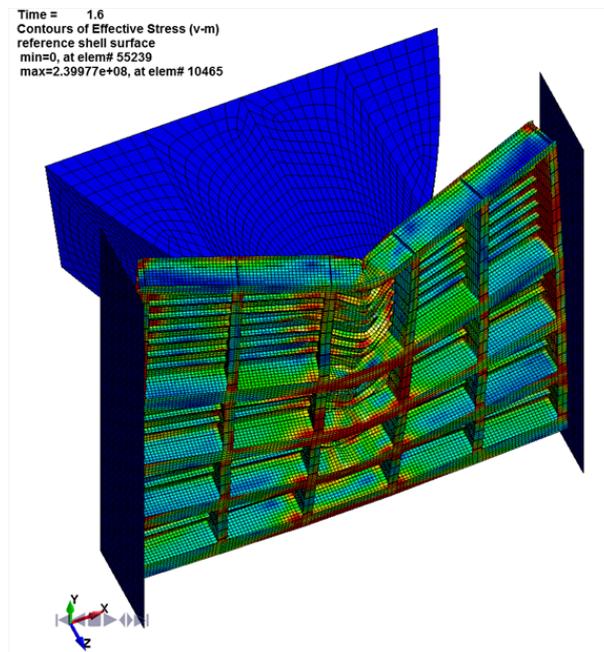


FIGURE 5.3 – Rotule plastique

Pour un même point d'impact, le cheminement des contraintes de von Mises est identique pour les différents modèles étudiés. Une augmentation d'épaisseur d'un élément constitutif de la porte ne change donc pas considérablement les modes de déformations observables dans la porte.

5.2 L'énergie de Hourglass

La porte d'écluse est maillée par des éléments quadrilatères du premier ordre à intégration réduite, c'est-à-dire avec un point d'intégration par maille. L'utilisation de ce type d'élément peut conduire à des modes de déformations à énergie nulle, appelés modes de hourglass.

Si cette énergie de hourglass est inférieure à 5% de l'énergie interne du modèle, alors aucune attention particulière ne sera apportée à ce phénomène.

Sur le graphique 5.4 est représenté le pourcentage d'énergie de Hourglass pour la porte de 13m lors d'un impact sur une traverse. L'énergie interne totale dans la porte est de 8MJ et l'énergie de Hourglass ne représente que 2,5% de cette énergie.

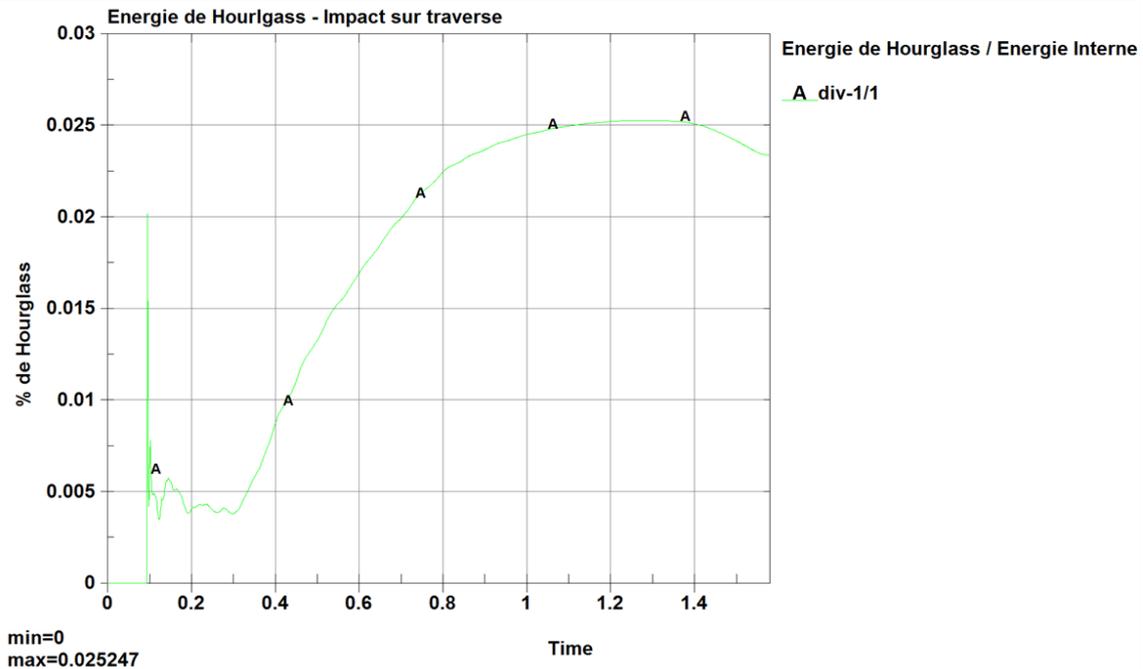


FIGURE 5.4 – Pourcentage d'énergie de Hourglass dans le modèle de Th. Gernay pour un impact sur une traverse.

L'énergie de hourglass a été contrôlée pour chacune des simulations réalisées. Cette énergie étant toujours inférieure à 5% de l'énergie interne totale, il n'y a pas d'attention particulière à porter à ces phénomènes.

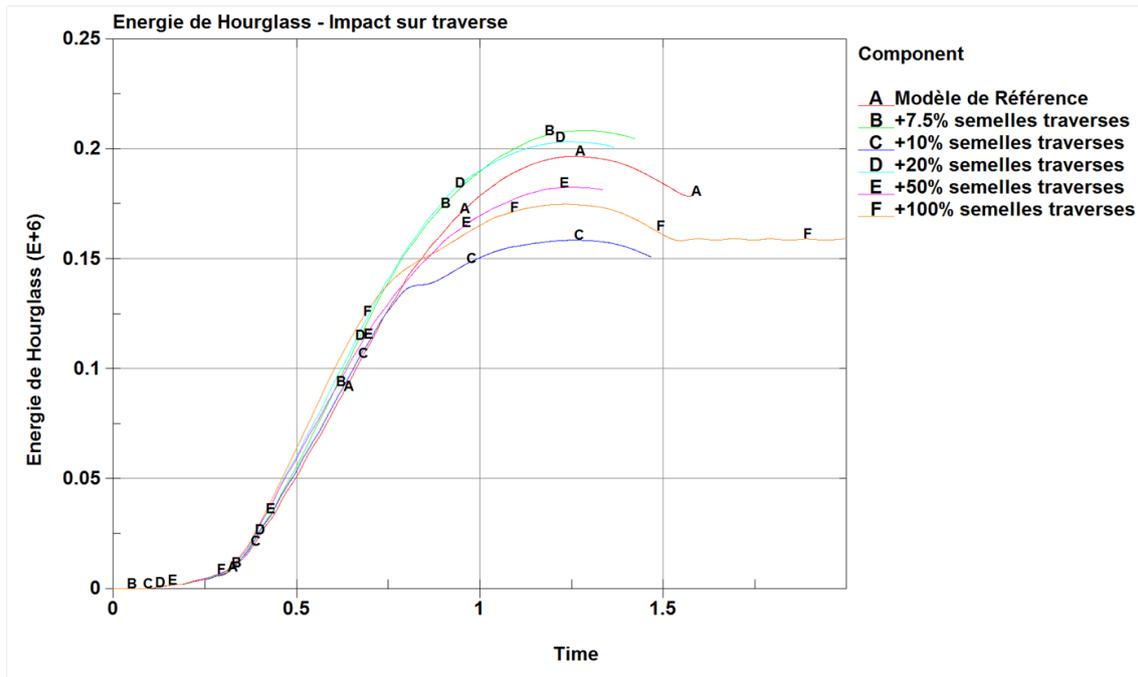


FIGURE 5.5 – Energie de Hourglass lors d’une modification des semelles des traverses pour un impact sur traverse

Dans le tableau 5.1, sont représentées les énergies de Hourglass pour chacune des modifications d’épaisseur des semelles des traverses lors d’un impact sur une traverse. La troisième colonne représente le rapport de l’énergie de Hourglass du modèle considéré et de l’énergie de Hourglass du modèle de référence. La cinquième colonne représente le rapport entre l’enfoncement du modèle considéré et du modèle de référence.

Modification de l’épaisseur des semelles des traverses	Energie de Hourglass	$\Delta_{Hourglass}$	Enfoncement	$\Delta_{Enfoncement}$
Modèle de référence	$1,9653 \times 10^5$	1	1,4573	1
+7,5%	$2,0826 \times 10^5$	105,97%	1,4742	101,16%
+10%	$1,585 \times 10^5$	80,65%	1,4541	99,78%
+20%	$2,0325 \times 10^5$	103,42%	1,4389	98,74%
+50%	$1,8254 \times 10^5$	92,88%	1,4563	99,93%
+100%	$1,7484 \times 10^5$	88,96%	1,4178	97,29%

TABLE 5.1 – Variation de l’énergie de Hourglass

Une augmentation d’énergie de Hourglass observée n’entraîne pas systématiquement une augmentation de l’enfoncement du bateau dans la porte. En effet, pour le modèle dont l’épaisseur a été incrémentée de 20% par exemple, l’énergie de Hourglass est plus importante que celle présente dans le modèle de référence, alors que l’enfoncement observé diminue.

L’énergie de Hourglass peut donc être négligée dans les simulations car son influence ne semble pas considérable sur les résultats obtenus. De plus, l’augmentation de l’énergie de Hourglass ne correspond pas à la variation d’enfoncement observé dans la porte.

5.3 Energie interne

L'énergie interne d'un élément à parois de type plaque et coque est donnée par l'expression :

$$\dot{E} = t_p \iint_A \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} \cdot dA \quad (5.2)$$

Où

- t_p est l'épaisseur de l'élément
- $\underline{\underline{\sigma}}$ et $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}$ sont respectivement les contraintes et champs de déformation de l'élément considéré.

Les éléments de la porte étant considérés parfaitement plastique, cette équation devient :

$$\dot{E} = \sigma_0 \cdot t_p \iint_A \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} \cdot dA \quad (5.3)$$

L'énergie interne totale de la porte est de $8MJ$. Cette énergie est identique quel que soit le modèle défini. En effet, cette énergie est donnée par la masse et la vitesse du navire qui restent inchangés tout au long des simulations.

Lors d'une modification d'épaisseur d'un type d'élément constructif de la porte, cette distribution d'énergie évolue dans la porte. Les augmentations de l'enfoncement lors d'un épaissement de différents éléments constitutifs vont être analysés. Le graphique 5.6 représentant la variation interne d'énergie dans la porte lorsque le choc du bateau se produit entre un cadre et une traverse. Celui-ci est comparé au graphique 5.7 représentant la variation interne d'énergie dans la porte lorsque le choc du bateau se produit sur une traverse. Dans ces cas, la variation de poids vient d'une augmentation d'épaisseur de la semelle des traverses.

Les variations d'énergie interne dans le cas d'un choc sur traverse sont nettement plus importantes.

A champ de contraintes égal, l'épaisseur t_p des semelles des traverses augmente et le champ de déplacement $\iint_A \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} \cdot dA$ diminue. Cela provoque une diminution de l'énergie interne. Dans les semelles des cadres, l'énergie interne augmente, alors que l'épaisseur reste inchangée. Le champ de déplacement dans les semelles des cadres $\iint_A \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} \cdot dA$ augmente.

Cette augmentation provoque dans un premier temps une chute d'énergie interne dans les semelles des traverses ainsi que dans le bordé directement impactés. Cette perte d'énergie interne est reprise par les semelles des cadres. Une augmentation de l'épaisseur augmente la rigidité de l'élément qui reprend moins d'effort. Cet effort est alors repris par d'autres éléments dont le déplacement est accru.

Les variations d'énergie interne dans la porte de 13m pour les deux points d'impact développés ci-dessus sont données dans le tableau ci-dessous :

	Choc centré	Choc sur traverse
\dot{E} semelles cadres	30,7kJ	103,3kJ
\dot{E} semelles traverses	-80,7kJ	-238,35kJ

TABLE 5.2 – Variation de l'énergie interne

On voit donc que l'énergie interne au sein des différents éléments constitutifs varie selon les modèles étudiés. En effet, une augmentation de l'épaisseur d'un élément entraîne une augmentation de la raideur de cet élément. Comme dans le cas d'une augmentation de l'épaisseur des semelles des traverses, la raideur de cet élément devient telle que l'énergie se répartit dans un élément de moindre raideur.

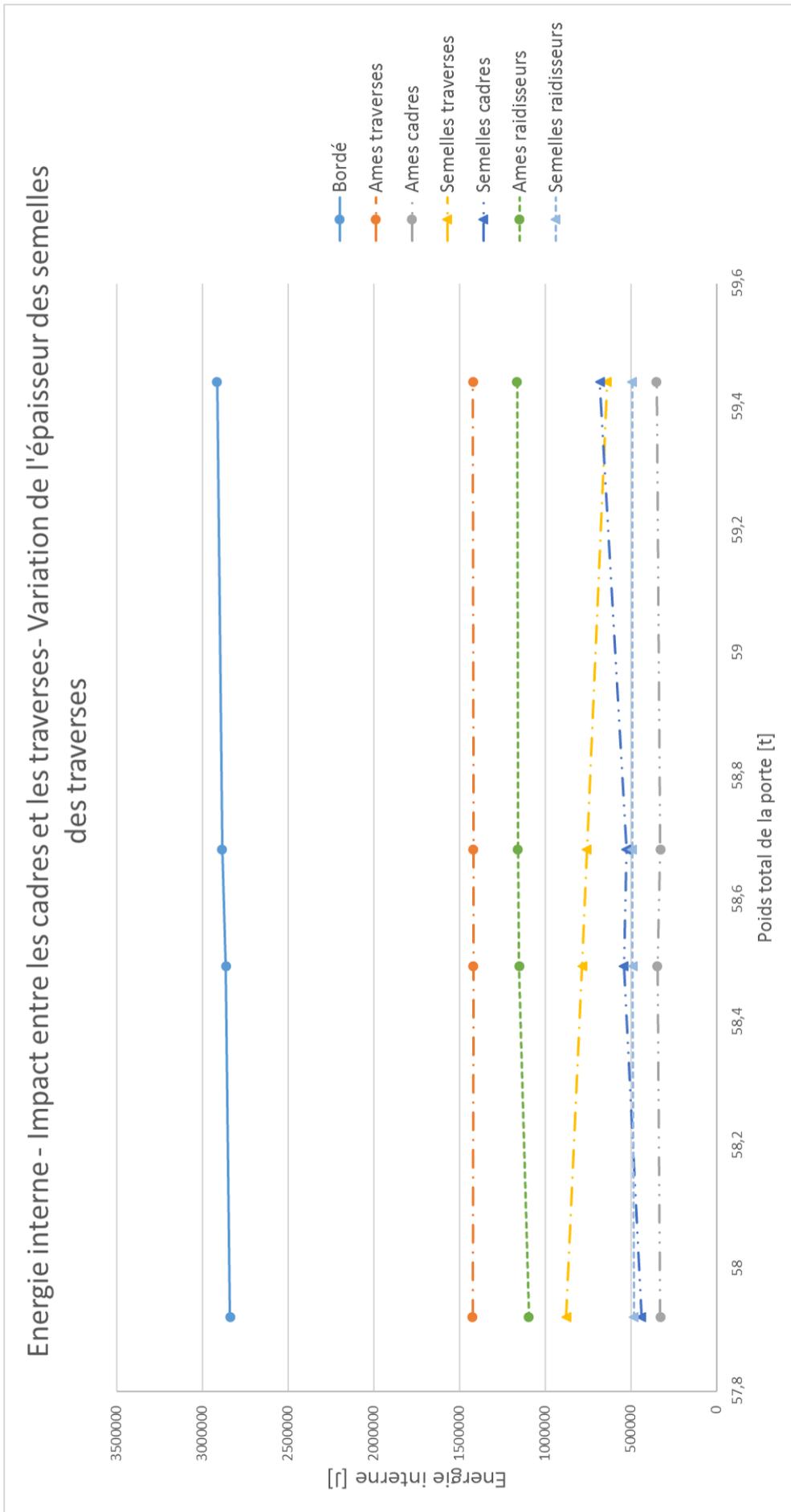


FIGURE 5.6 – Variation de l'énergie interne - Choc entre une traverse et un cadre avec modification de l'épaisseur des semelles des traverses - Porte 13m

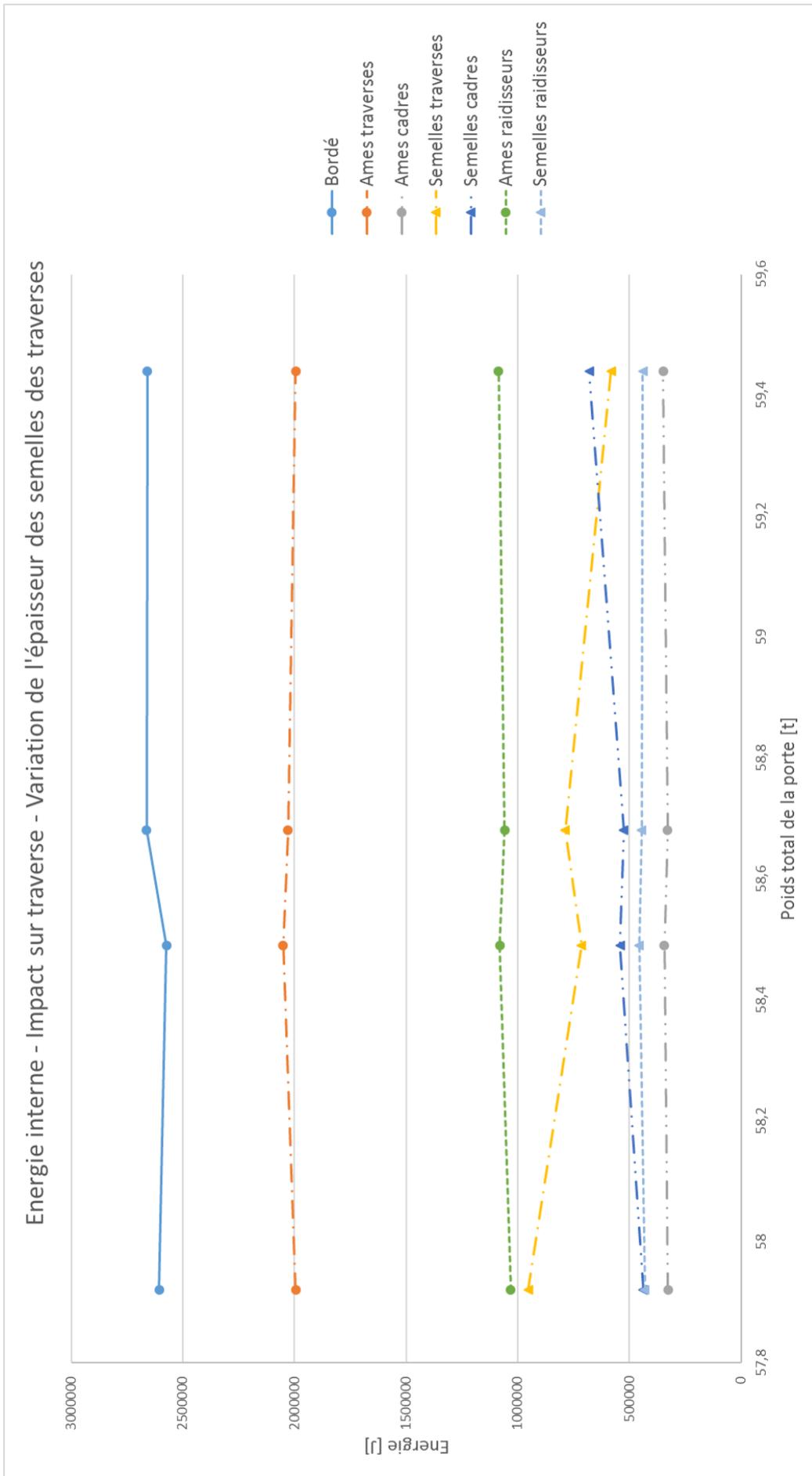


FIGURE 5.7 – Variation de l'énergie interne - Choc sur une traverse supérieure avec modification de l'épaisseur des semelles des traverses - Porte 13m

Chapitre 6

Piste d'optimisation

Dans la première partie de ce travail, une analyse de la sensibilité de la résistance de différentes portes a été menée lorsqu'une modification de l'épaisseur des différents éléments était appliquée. Sur base des résultats obtenus à la section 4, nous allons tenter d'amener des pistes d'amélioration à apporter à la porte afin d'accroître encore cette résistance.

Comme nous l'avons vu dans la partie 4.3., lors d'un impact, des rotules plastiques se forment et empêchent la bonne transmission des efforts dans les éléments éloignés du point d'impact.

Des pistes d'optimisations, plus efficaces que l'augmentation de l'épaisseur des éléments constitutifs de la porte vont donc être émises.

La première piste émise serait d'éviter que les espacements entre les traverses soient trop différents. En effet, comme évoqué précédemment, les traverses sont positionnées pour reprendre la pression hydrostatique. Cette pression étant plus importante au pied de la porte, l'espacement entre ces éléments est alors réduit et augmente vers le sommet de la porte. Cependant, lors d'un impact de navire, il peut être judicieux de revoir quelque peu la géométrie de la porte afin d'assurer une bonne transmission des efforts.

Une seconde piste d'optimisation consisterait à renforcer les cadres afin de réduire le risque de formation de rotule plastique.

Dans ce chapitre, une étude de la première piste d'optimisation est menée afin d'évaluer sa pertinence.

6.1 Piste étudiée : Ajout d'une traverse

Un nouveau modèle a donc été réalisé en ajoutant une traverse afin que les espacements entre les différents éléments soient compris entre $2,3m$ et $3m$.

La porte a également été allégée afin de pouvoir comparer les résultats obtenus. Pour cela, les âmes et les semelles des traverses ont une épaisseur de $20mm$. La porte a donc un poids total de $58,35$ tonnes soit une augmentation de poids de seulement $0,74\%$ par rapport au modèle référence de la porte de $13m$

Deux points d'impact ont été testés :

- Impact entre les cadres et les traverses en partie haute de la porte
- Impact sur traverse en partie basse de la porte.

Pour ces deux points d'impact, les déformations, les contraintes ainsi que les efforts repris par la porte sont analysés. Nous étudierons la formation d'éventuelles rotules plastiques qui pourraient une fois de plus empêcher la transmission des efforts dans les différents éléments de raidissage.

Ensuite, nous incrémenterons progressivement l'énergie cinétique du bateau. Le but est de trouver la valeur de l'énergie cinétique du bateau qui produit un enfoncement identique au cas de la porte de $13m$ comportant 5 traverses.

6.1.1 Impact entre les cadres et les traverses en partie haute de la porte

Suite à l'ajout d'une traverse, les élancements des cadres sont diminués. Cela semble engendrer une meilleure transmission des efforts et par conséquent, des déformations et des contraintes de Von Mises dans l'ensemble des traverses et des raidisseurs.

Déformations et contraintes

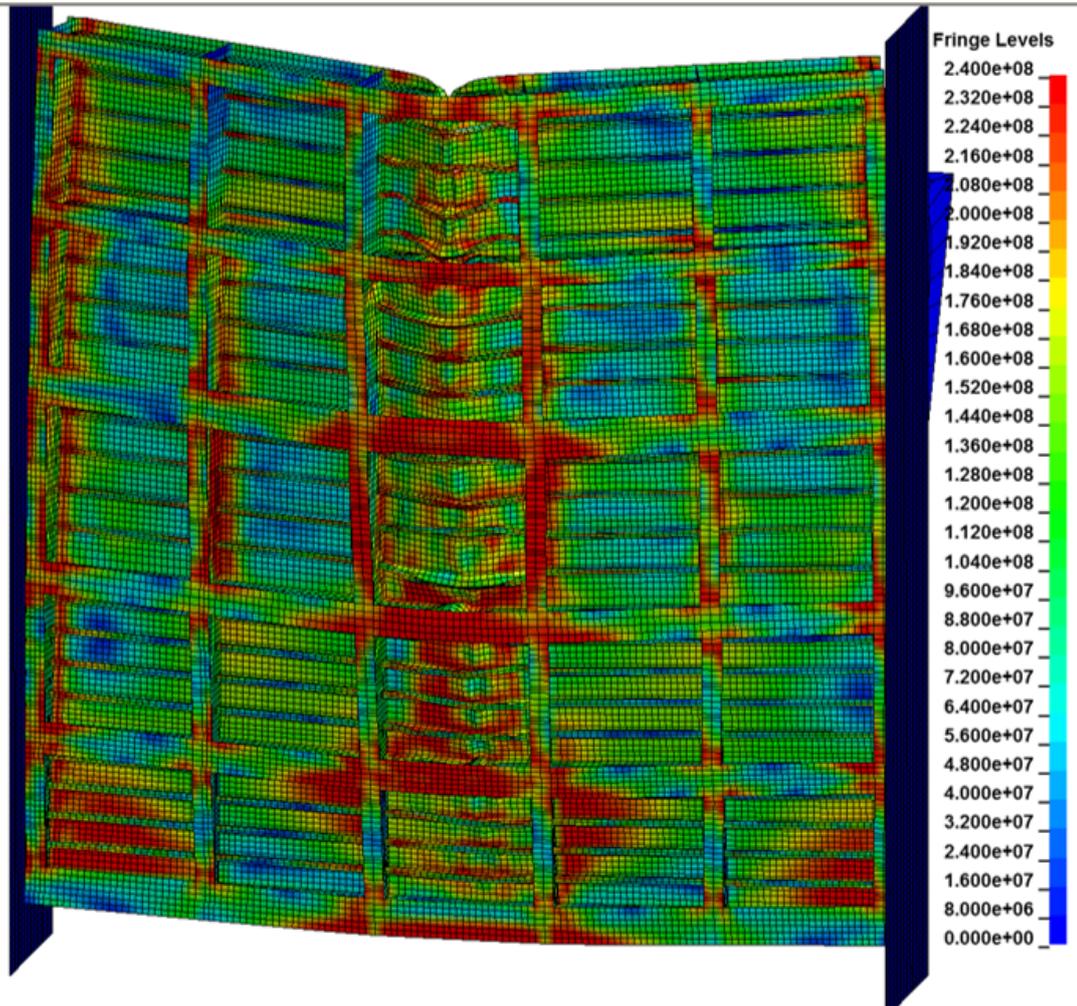


FIGURE 6.1 – Déformations et contraintes - Porte 3 - Impact entre les cadres et les traverses en partie supérieure

La porte semble donc contribuer entièrement à la reprise de l'effort. Ce qui lui assurera une meilleure résistance en cas d'impact.

Nous allons à présent étudier plus précisément le cas des traverses et des raidisseurs, où la formation de rotules plastiques était particulièrement visible dans la porte de 13m.

Concernant les traverses, les plus déformées, sont sans surprise les éléments impactés. Cependant, les traverses non impactées semblent tout de même reprendre une part de l'effort.

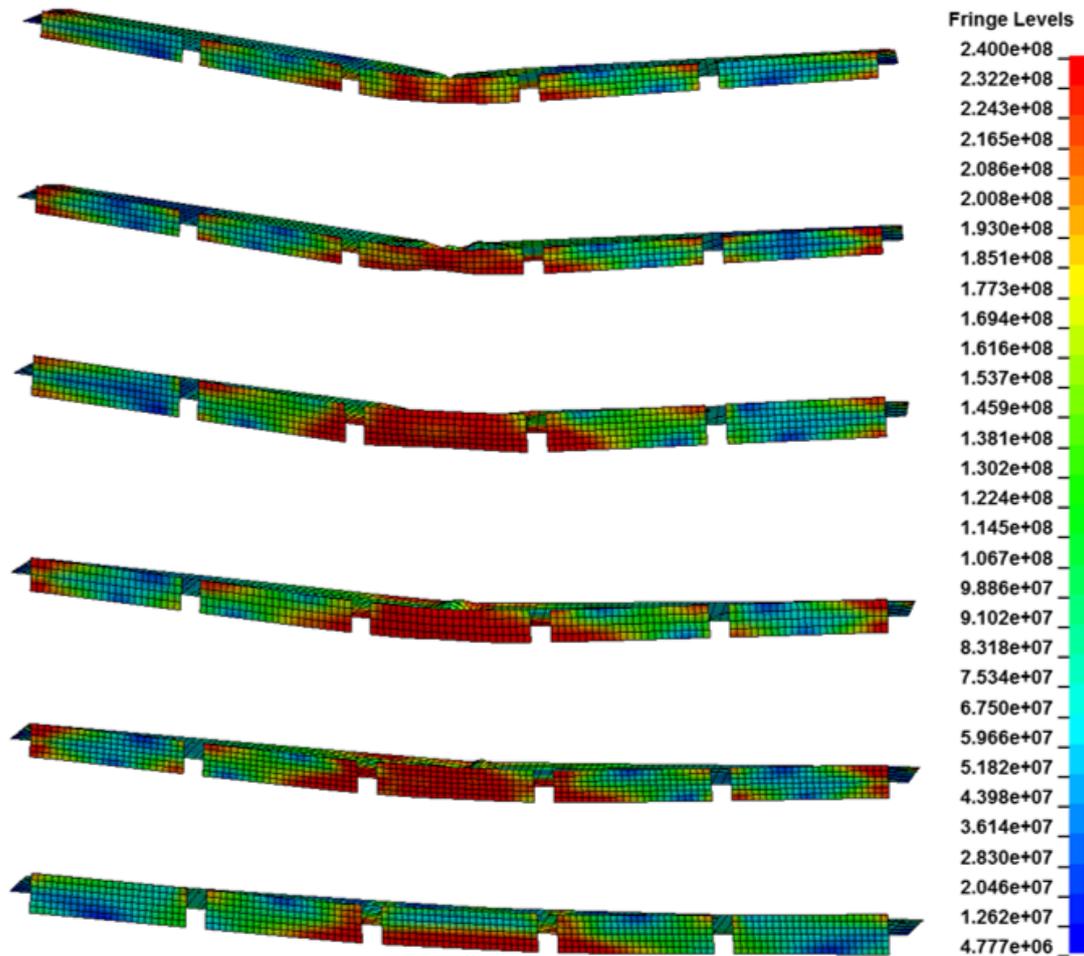


FIGURE 6.2 – Déformations et contraintes dans les traverses - Porte 3 - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute

En ce qui concerne les raidisseurs, dans le cas de la porte de 13m, la rangée de raidisseurs situés entre la première et la deuxième traverses ne participaient pas à la reprise de l'effort. Nous pouvons observer que sur la figure 6.3, tous les raidisseurs reprennent une partie de l'effort.

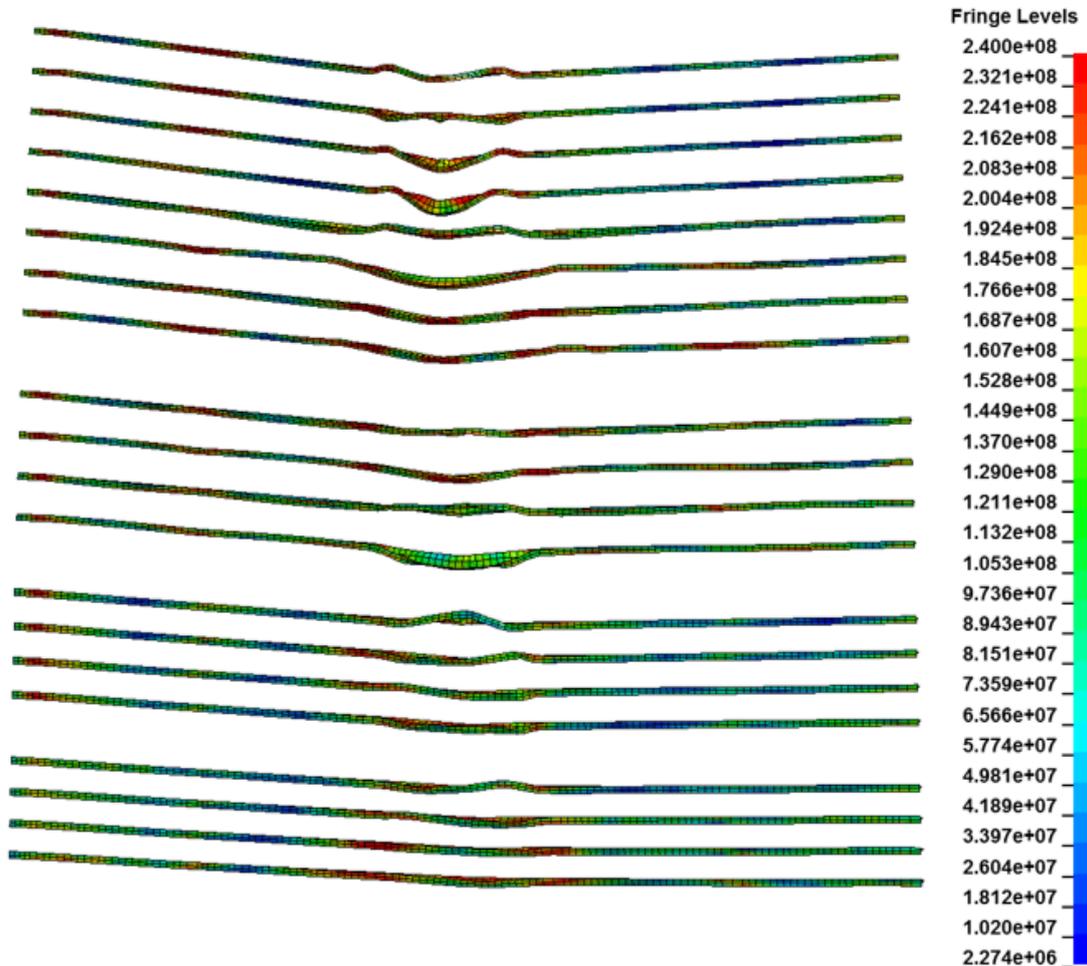


FIGURE 6.3 – Déformations et contraintes dans les raidisseurs - Porte 3 - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute

Etude de l'enfoncement

Avec l'ajout d'une traverses, l'enfoncement dans la porte diminue. Nous allons donc faire varier l'énergie cinétique du bateau et donc sa masse afin de déterminer un enfoncement égal au cas de la porte de 13m. Les valeurs des enfoncements obtenus sont repris dans le tableau ci-dessous :

Porte	13m	Porte 3		
Energie	8MJ	8MJ	9MJ	10MJ
Enfoncement maximum	1.8722 m	1.6709 m	1,8109 m	1,9466 m

TABLE 6.1 – Variation de l'enfoncement - Porte 3 - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute

Le graphique 6.4 représente l'évolution de l'enfoncement du bateau pour ces différentes énergies.

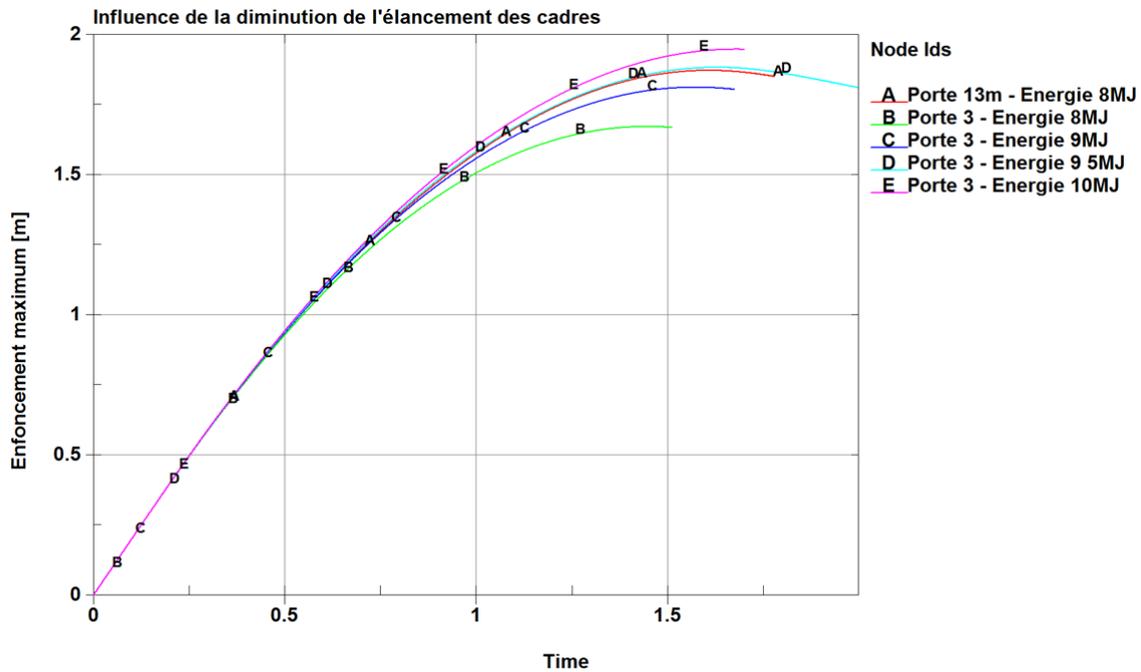


FIGURE 6.4 – Influence d'une traverse supplémentaire sur l'enfoncement - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute

L'ajout d'une traverse provoque donc à énergie égale, une diminution de l'enfoncement de 10,75% par rapport à celui observé lors d'un impact sur la porte de 13m. Rappelons que les traverses, dans ce nouveau modèle, ont été allégées et l'augmentation du poids de la porte n'est que de 0,74%.

Cette augmentation de poids correspond à une augmentation de 2,5% de l'épaisseur du bordé qui provoquait une diminution de l'enfoncement de seulement 0,7%. Lors d'une augmentation de 15% des âmes des raidisseurs, éléments constitutifs apportant une résistance maximale à la porte, le poids de la porte a augmenté de 0,9% alors que l'enfoncement n'a diminué que de 2,4%.

De plus, pour un enfoncement égal, l'énergie nécessaire à la porte 3 est de 9,5MJ soit 18,75% de plus que celle dans la porte de 13m.

Nous constatons donc, qu'à poids égal et pour un impact entre les cadres et les traverses en partie haute de la porte, l'ajout d'une traverse a une influence bien plus grande sur la résistance de la porte qu'une simple augmentation d'épaisseur des éléments constitutifs de la porte.

Effort

Les efforts repris par le bordé pour la porte de 13m et pour la porte 3 vont à présent être comparés. Le graphique 6.5 représente l'évolution de l'effort en fonction du temps.

A énergie égale, l'ajout d'une traverse augmente considérablement les efforts repris dans la porte. Le tableau 6.2 reprend les efforts moyens repris par les deux portes étudiées.

Porte	13m	3
Effort moyen	4,63 MN	5,41 MN

TABLE 6.2 – Efforts moyens pour un impact entre les cadres et les traverses

L'ajout d'une traverse et donc la diminution de l'élanement des cadres en partie supérieure de la porte permet, à poids égal de la porte, une augmentation de 16,8%.

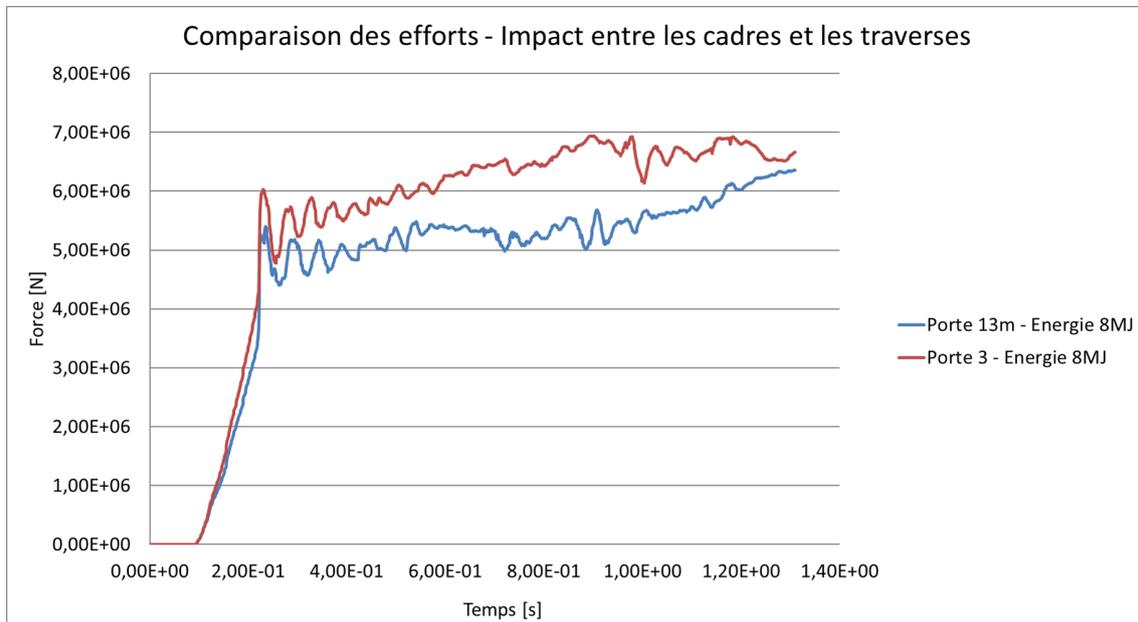


FIGURE 6.5 – Comparaison de l'effort repris par la porte lors d'un impact entre les cadres et les traverses

Lors d'un impact entre les cadres et les traverses en partie supérieure de la porte, l'ajout d'une traverse afin d'uniformiser les hauteurs de cadres semblent donc tout à fait favorable à la résistance de la porte. En effet, l'enfoncement est réduit considérablement alors que l'énergie moyenne reprise par la porte augmente.

6.1.2 Impact sur une traverse en partie haute de la porte

Etude de l'enfoncement

Comme dans le cas précédent, l'enfoncement de la porte diminue avec l'ajout d'une traverse. Nous allons donc faire varier l'énergie cinétique du bateau et donc sa masse afin de constater la variation d'enfoncement. Les valeurs des enfoncements obtenus sont repris dans le tableau ci-dessous :

Porte	13m	Porte 3			
Energie	8MJ	8 MJ	8,5MJ	8.75MJ	9MJ
Enfoncement maximum	1.4537 m	1.373 m	1,4406m	1,4735m	1,4978 m

TABLE 6.3 – Variation de l'enfoncement - Porte 3 - Impact entre les cadres et les traverses en partie haute

Le graphique 6.6 représente l'évolution de l'enfoncement du bateau pour ces différentes énergies.

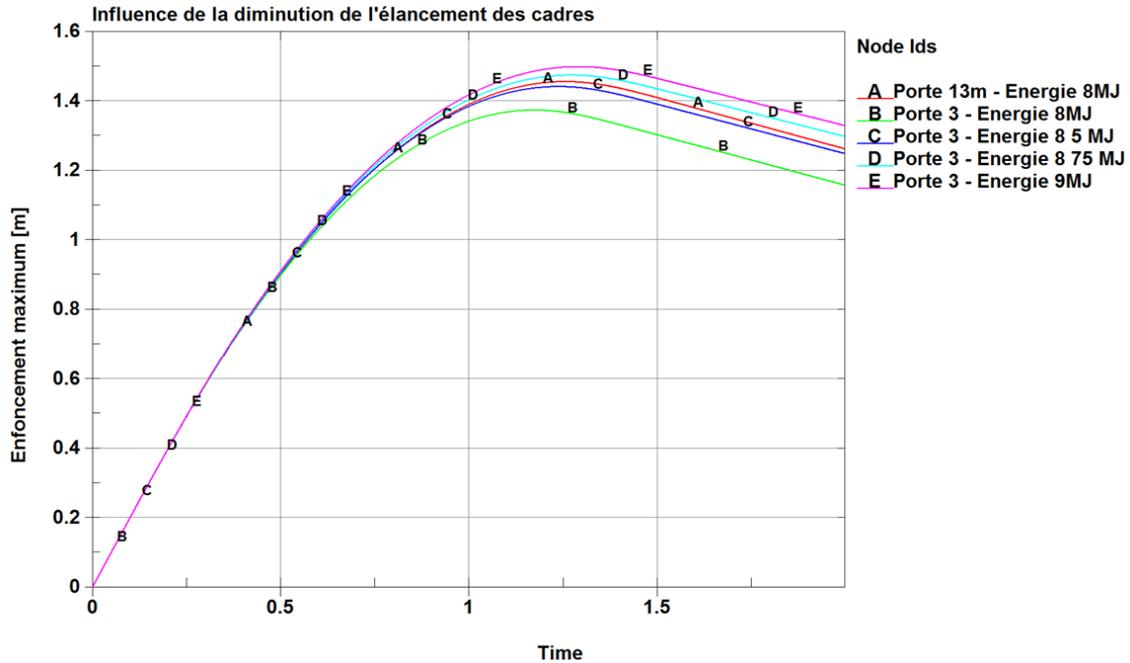


FIGURE 6.6 – Influence d'une traverse supplémentaire sur l'enfoncement - Impact sur une traverse en partie haute

L'ajout d'une traverse provoque donc à énergie égale, une diminution de l'enfoncement de 5,55% par rapport à celui observé lors d'un impact sur la porte de 13m. Rappelons que les traverses, dans ce nouveau modèle, ont été allégées et l'augmentation du poids de la porte n'est que de 0,74%.

De plus, pour un enfoncement égal, l'énergie nécessaire à la porte 3 est obtenue par interpolation linéaire et est d'environ 8,6MJ soit 8,125% de plus que celle dans la porte de 13m.

Nous constatons donc, qu'à poids égal et pour un impact sur une traverse en partie haute de la porte, l'ajout d'une traverse a également une influence plus importante sur la résistance de la porte qu'une simple augmentation d'épaisseur des éléments constitutifs de la porte.

Effort

Les efforts repris par le bordé pour la porte de 13m et pour la porte 3 vont à présent être comparés. Le graphique 6.7 représente l'évolution de l'effort en fonction du temps.

A énergie égale, l'ajout d'une traverse augmente considérablement les efforts repris dans la porte. Le tableau 6.4 reprend les efforts moyens repris par les deux portes étudiées.

Porte	13m	3
Effort moyen	6,26 MN	6,82 MN

TABLE 6.4 – Efforts moyens pour un impact entre les cadres et les traverses

L'ajout d'une traverse et donc la diminution de l'élanement des cadres en partie supérieure de la porte permet, à poids égal de la porte, une augmentation de 8,96% de l'effort moyen repris.

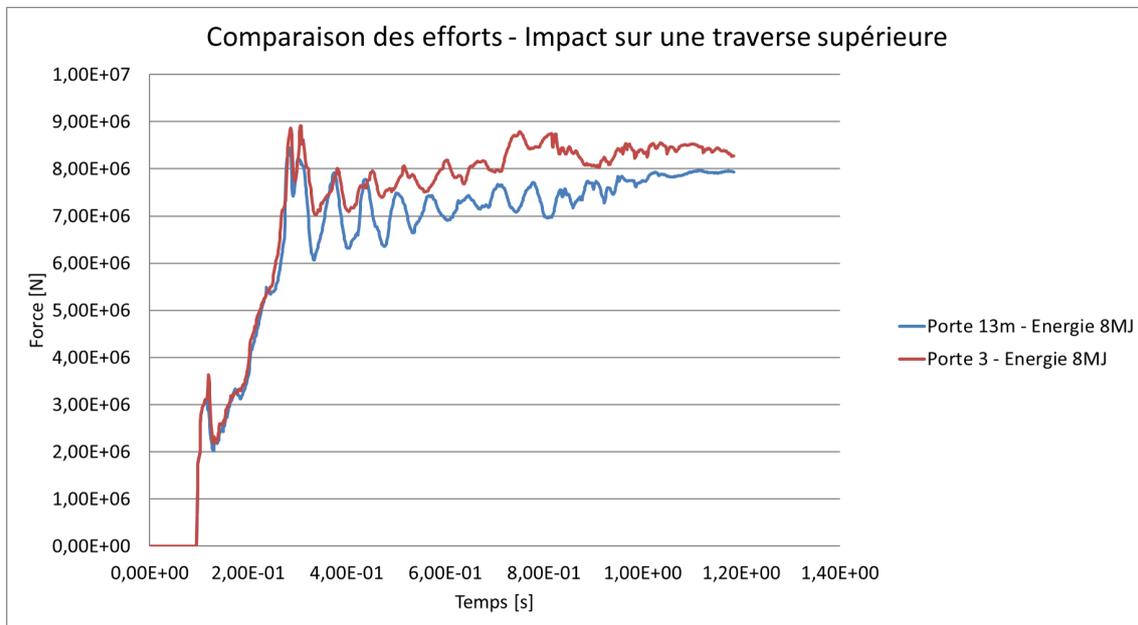


FIGURE 6.7 – Comparaison de l'effort repris par la porte lors d'un impact sur une traverse supérieure

Lors d'un impact sur une traverse en partie supérieure de la porte, l'ajout d'une traverse afin d'uniformiser les hauteurs de cadres semblent donc tout à fait favorable à la résistance de la porte. En effet, l'enfoncement est réduit considérablement alors que l'énergie moyenne reprise par la porte augmente.

6.1.3 Impact sur une traverse en partie basse de la porte

Déformations et contraintes

Lors d'un impact en partie basse, la formation de rotules plastiques était particulièrement visible au niveau de la troisième traverse. En effet, les raidisseurs et traverses situés au-dessus de ces rotules ne participaient pas à la reprise de l'effort car la transmission

n'était plus assurée.

Le graphique 6.8 représente les déformations et les contraintes dans la porte comportant 6 traverses pour une énergie cinétique du navire de $8MJ$. Nous constatons que la traverse ajoutée reprend une part importante de l'effort tandis que la sixième traverse ne participe que très peu à la reprise de l'effort et à la dissipation d'énergie.

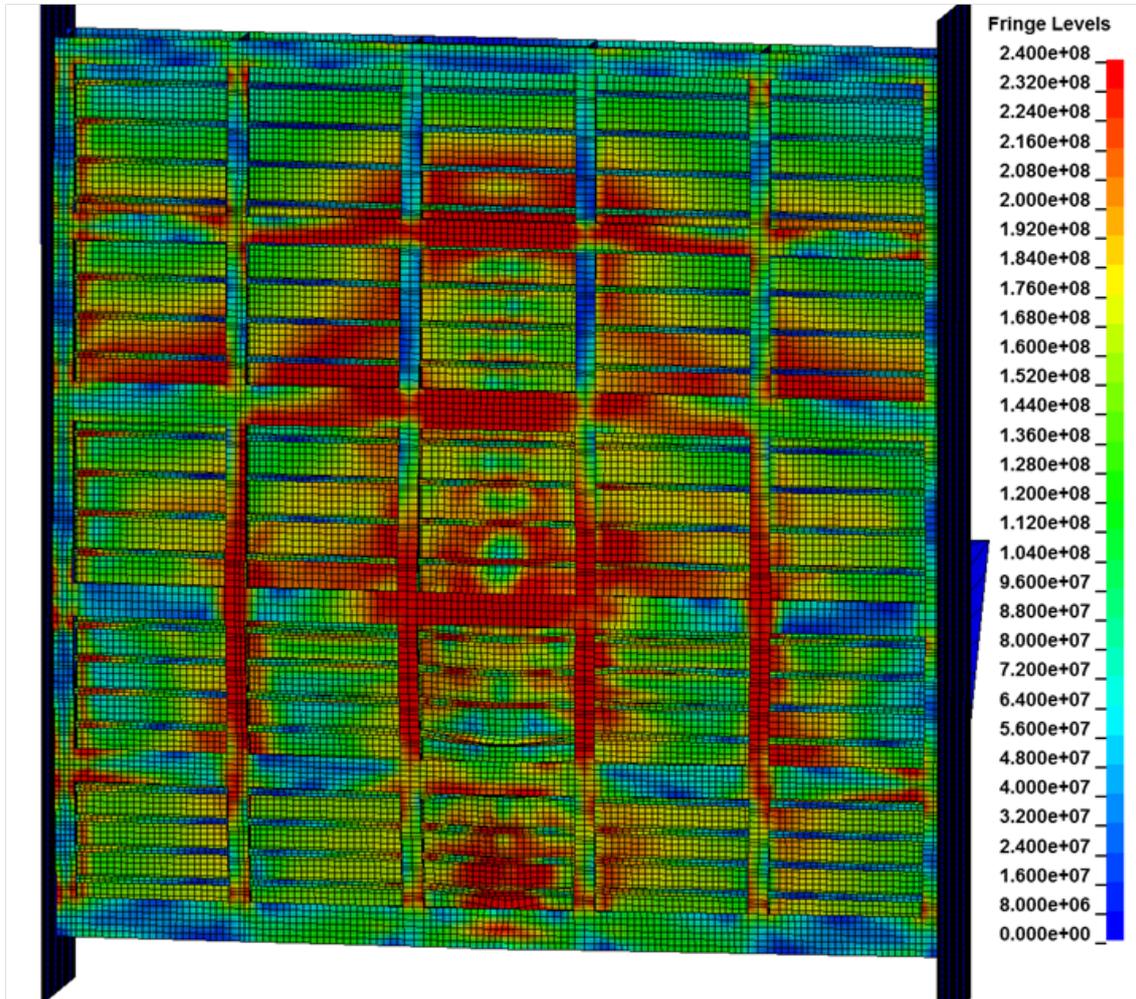


FIGURE 6.8 – Déformations et contraintes de la Porte 3 - Impact sur une traverse en partie basse

En ce qui concerne les raidisseurs, les déformations sont considérablement réduites. Les contraintes maximales sont observables sur les raidisseurs directement impactés mais semblent se répartir sur l'ensemble de la structure.

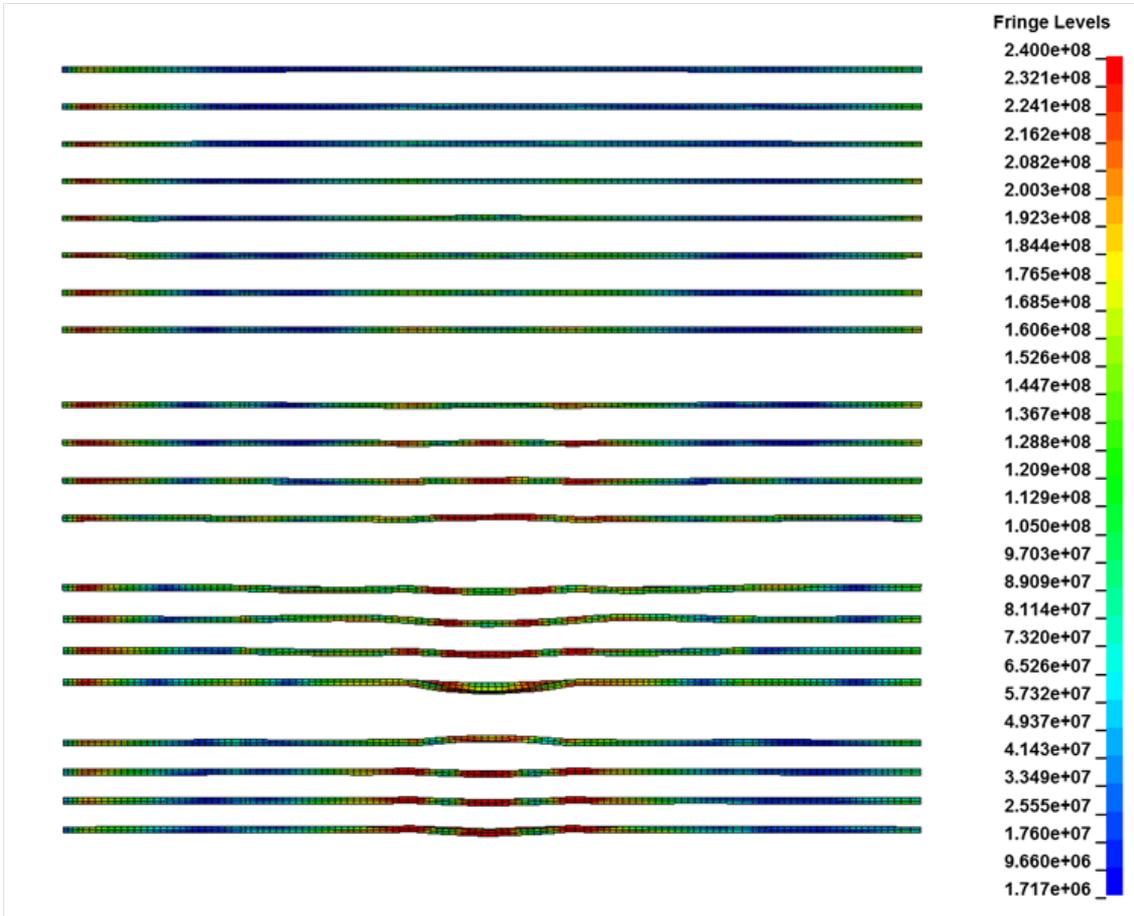


FIGURE 6.9 – Déformations et contraintes dans les raidisseurs - Porte 3 - Impact sur une traverse en partie basse

Lors d'un impact en partie inférieure de la porte, l'ajout d'une traverse supplémentaire, et donc la diminution de l'élancement des cadres entre ces traverses, diminue considérablement les déformations.

Etude de l'enfoncement

Nous allons à présent observer l'influence de la traverse supplémentaire sur l'enfoncement du bateau dans la porte. Sur le graphique 6.10, l'enfoncement du bateau dans la porte de 13m et celui dans la porte 3 sont comparés pour un impact agissant sur une traverse inférieure.

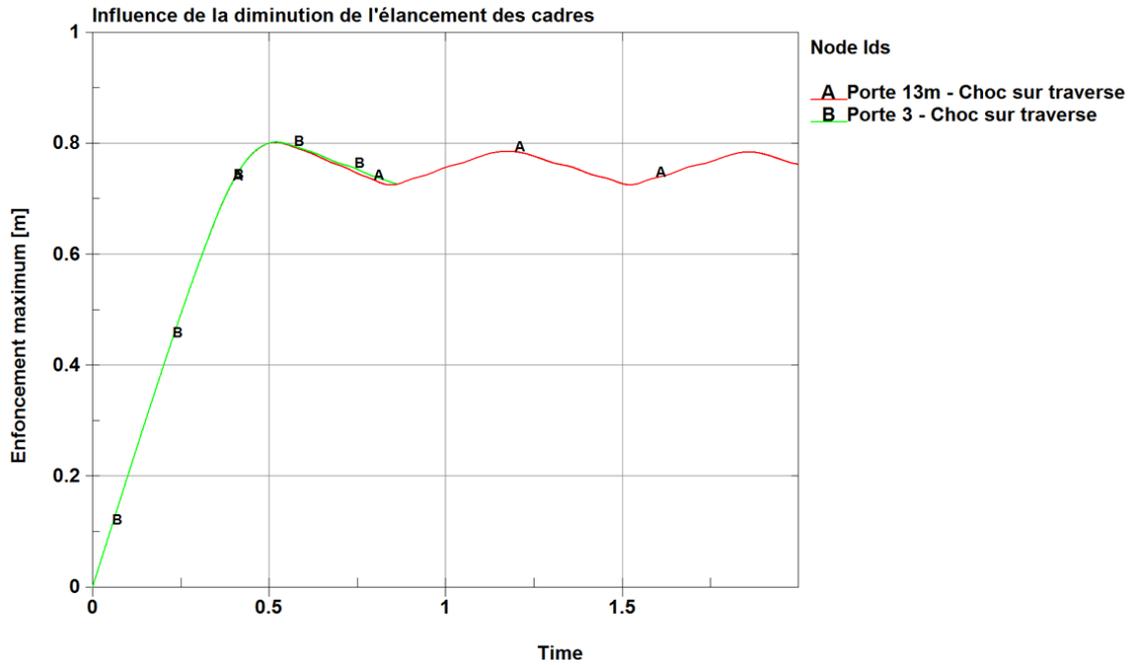


FIGURE 6.10 – Influence d’une traverse supplémentaire sur l’enfoncement - Impact sur une traverse en partie basse de la porte

Dans ces deux cas, l’enfoncement observable est identique. Cela paraît logique car dans la partie impactée, la densité des éléments de raidissage est identique. Nous aurions tout de même pu nous attendre à une légère croissance de l’enfoncement car les traverses ont été allégées. Il n’en est cependant rien.

Effort

Les efforts repris par le bordé pour la porte de 13m et pour la porte 3 vont à présent être comparés. Le graphique 6.11 représente l’évolution de l’effort en fonction du temps.

À énergie égale, lors d’un impact en partie inférieure de la porte l’ajout d’une traverse en partie supérieure n’a aucune influence sur les efforts repris dans la porte. Le tableau 6.5 reprend les efforts moyens repris par les deux portes étudiées.

Porte	13m	3
Effort moyen	7,87 MN	7,84 MN

TABLE 6.5 – Efforts moyens pour un impact entre les cadres et les traverses

Ces résultats s’expliquent par la densité similaire des éléments de raidissage dans la zone d’impact.

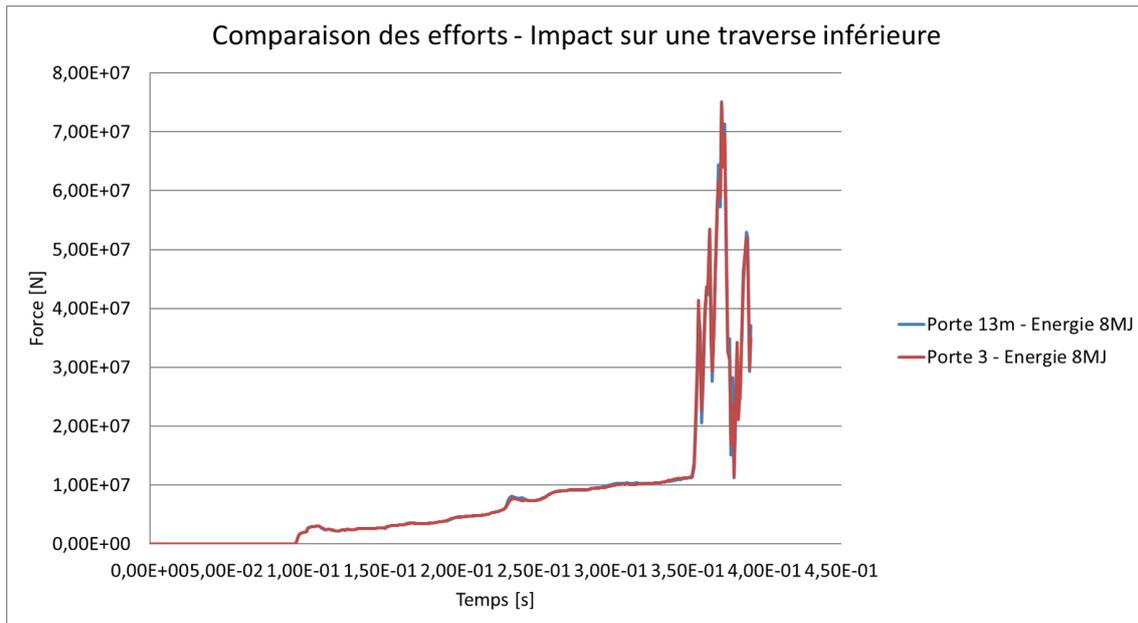


FIGURE 6.11 – Comparaison de l'effort repris par la porte lors d'un impact sur une traverse inférieure

6.1.4 Résultats

Dans ce sixième chapitre, la résistance de la porte a été étudiée lors de l'ajout d'une traverse. Les résultats obtenus sont très encourageants.

En effet, l'ajout d'une traverse entraîne une diminution de l'éclatement des cadres et diminue le risque de formation de rotules plastiques. Une meilleure transmission des efforts entre les éléments constitutifs de la porte est donc observée.

Ensuite, l'ajout d'une traverse semble avoir une influence considérable sur la résistance de la porte lors d'un impact en partie supérieure. En effet, la diminution de l'éclatement des cadres permet non seulement de diminuer considérablement l'enfoncement du bateau dans la porte mais également d'augmenter l'effort repris par la porte.

En partie basse, l'enfoncement ainsi que l'effort repris par la porte restent constants malgré une diminution des épaisseurs des âmes et des semelles des traverses.

Cette piste d'optimisation a donc une influence bien plus marquée sur la résistance de la structure que l'augmentation des épaisseurs des différents éléments.

Chapitre 7

Conclusions générales

L'objectif de ce travail de fin d'études consistait à identifier parmi toutes les variables d'entrées, celles qui auront la plus grande influence sur la résistance au choc. Les résultats obtenus par analyses numériques et en complément des modèles analytiques définis précédemment, permettent de guider un optimiseur tel que LBR-5 dans le choix des éléments à modifier pour augmenter la résistance de la porte sans accroître de façon trop importante le poids ou le coût de la structure.

Le travail présenté dans ce rapport débute par l'étude de la résistance pour une géométrie de porte fixée. Un premier modèle de porte de forme carrée, basé sur la porte dimensionnée par Th. Gernay dans son Travail de Fin d'Etudes "Aménagement de la voie navigable "Seine-Escaut Est"" a été réalisé sous le logiciel Patran. Ensuite, un second modèle de forme rectangulaire a été modélisé afin de comparer les résultats obtenus.

Différents modèles faisant varier les épaisseurs du bordé ainsi que des âmes et semelles des éléments de raidissages ont été choisis. Un impacteur de référence a été défini et différents points d'impact ont été fixés.

Les enfoncements obtenus après simulations ont pu être étudiés et comparés en fonction de la variation du poids de la porte. Ces résultats nous ont permis de tirer comme première conclusion qu'une augmentation du bordé ou des âmes des traverses avait une influence plus importante sur la résistance de la porte. De plus, lors d'un impact en partie haute, il est également intéressant d'augmenter l'épaisseur des raidisseurs qui apportent une résistance accrue à la porte.

Ensuite, une étude de l'évolution des efforts repris par la porte a été réalisée. Celle-ci a permis de tirer comme seconde conclusion qu'une augmentation des éléments constitutifs de la porte avait comme influence globale d'augmenter l'effort maximum ainsi que l'effort moyen repris dans la porte. Cette conclusion n'est cependant pas vérifiée dans le cas d'une augmentation des raidisseurs. Pour ces éléments, une augmentation de l'épaisseur des semelles provoque une augmentation de l'effort moyen repris par la porte mais une diminution de l'effort maximum dans le cas d'un impact entre les cadres et les traverses et une augmentation suivie d'une stagnation dans le cas d'un impact sur une traverse. Ce comportement s'explique par une meilleure répartition de l'effort dans la porte qui est un avantage au niveau de la structure globale mais également au niveau des réactions d'appuis qui sont un point faible de la résistance de la porte lors d'un impact de bateau. Une meilleure distribution des contraintes entraîne donc une diminution des contraintes maximales dans la porte et donc une diminution des réactions d'appuis.

Une analyse critique des résultats a également été menée. Cette analyse critique a permis d'une part de mettre en évidence une redistribution d'énergie interne entre les différents éléments constitutifs de la porte lors d'une augmentation d'épaisseur de certains d'entre-eux. Et d'autre part, une comparaison des déformations pour un impact en partie haute et en partie basse de la porte a permis de mettre en évidence la formation de rotules plastiques dans les cadres élancés provoquant une mauvaise collaboration de certains éléments.

En conclusion de cette première partie, des pistes de renforcements ont été émises pour une géométrie de porte fixe. Une augmentation des semelles des raidisseurs permet une meilleure redistribution de l'effort. En effet, L'enfoncement du bateau dans la porte ainsi que l'effort maximum et les réactions d'appuis dans la structure diminuent alors que l'effort moyen de la porte augmente. Il semble également très intéressant d'uniformiser l'espacement entre les traverses afin de ne pas créer de point faible où la formation de rotules plastiques est favorisée ce qui provoquera une moins bonne transmission des efforts.

Pour finir, des pistes d'optimisation faisant varier la géométrie de la porte ont été proposées sur base des résultats obtenus pour une géométrie fixe. L'idée est de réduire l'élanement des cadres afin de réduire le risque de formation de rotules plastiques et ainsi favoriser la transmission des efforts dans l'ensemble de la porte.

Une ébauche d'étude d'une des pistes d'optimisation consistant à ajouter une traverse en partie supérieure afin d'uniformiser les distances entre ces éléments a été menée. Il en ressort une diminution de l'enfoncement du navire dans la porte conséquente ainsi qu'une croissance de l'effort repris pour un poids de structure identique lors d'un impact en partie haute de la porte.

A l'issue de ce travail, j'ai pu tirer deux conclusions concernant le renforcement des portes planes à simple bordé. La première, pour une géométrie de porte fixe, une augmentation de l'épaisseur des semelles des raidisseurs apporte une résistance supplémentaire à la porte tout en diminuant l'effort maximum. La seconde, l'ajout d'une traverse, et donc l'uniformisation de l'entre-axes, combinée à une réduction des épaisseurs des traverses existantes afin de conserver un poids de la structure égal a un impact bien plus marqué sur la résistance de la porte soumise à un choc de bateau.

Chapitre 8

Recommandations

Ce travail a été réalisé principalement pour une géométrie de porte donnée et pour des paramètres d'impacteur fixés. Une analyse fine de la sensibilité de la résistance de la porte a d'abord été menée lors d'une modification de l'épaisseur du bordé ainsi que des âmes et des semelles des éléments de raidissage de différents types de portes.

Dans le cadre de la suite de ce travail, des pistes d'amélioration ont été émises et les prémices d'étude de l'une d'entre elle ont été proposées. Suivant les résultats obtenus, nous avons cherché à assurer une meilleure transmission des efforts afin que l'ensemble de la porte travaille.

La première idée était l'ajout d'une traverse en partie supérieure de la porte. A poids égal, cette solution avait une influence non négligeable sur la résistance de la porte et semble être plus efficace qu'une simple augmentation d'épaisseur des éléments constitutifs. Cependant, la transmission des efforts semble toujours localisée proche de l'impact.

Dans le cadre de la suite du travail, il serait donc intéressant de réaliser des analyses plus pointues pour une porte de géométries variables. En effet, étudier la variation de l'enfoncement pour différentes géométries permettraient de compléter ce travail.

Parmi les géométries qui pourraient être envisagées, il y a :

- Une variation du nombre et de l'espacement des traverses
- Un renforcement des cadres
- Une modification de la hauteur des âmes des cadres et des traverses

Cela permettrait, par des analyses fines de déterminer leur influence sur la résistance de la porte d'écluse pour une géométrie variable.

Bibliographie

- [1] AMDAHL J. , *Energy absorption in ship-platform impact*. Trondheim : Norwegian Institute of Technologies ; Thesis - 1982
- [2] BULDGEN L., LE SOURNE H., RIGO Ph., ‘*A simplified analytical method for estimating the crushing resistance of an inclined ship side*. Marine Structures - 2013.
- [3] BULDGEN L., ‘*Simplified analytical methods for the crashworthiness and the seismic design of lock gates*. Université de Liège - Thèse 2014.
- [4] BULDGEN L., LE SOURNE H., RIGO Ph., ‘*A simplified analytical method to estimate the resistance of plane lock gates impacted by river barges*. Marine Structures - 2015.
- [5] BULDGEN L., LE SOURNE H. , RIGO Ph., ‘*Fast Strength Assessment of Miter Gates to Ship Impact*. Marine Structures - 2015.
- [6] DEHOUSSE N., ‘*Les écluses de navigation*. Cours 1985.
- [7] GERNAY Th., ‘*Aménagement de la voie navigable “Seine-Escaut Est”*’. Université de Liège - Travail de Fin d’Etudes 2008-2009.
- [8] HONG L., AMDAHL J., *Crushing resistance of web girders in ship collision and grounding*. Mar Struct 2008 ;21 :374e401.
- [9] JOHANSSON B. ,MAQUOI R. , SEDLACEK G.,MÜLLER C. ,BEG D. *Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 : plated structural elements*. Brussels : European Commission Joint Research Center ; 2007.
- [10] JONES N., *Structural Impact*. Cambridge University Press 1997.
- [11] LE SOURNE H. , RODET JC., CLANET C. ,*Crashworthiness analysis of a lock gate impacted by two different river ships* Internal Journal of Crashworthiness, 7 (2002), 371-396.
- [12] LÜTZEN M., SIMONSEN BC., PERDESEN PT., *Rapid prediction of damage to struck and striking vessels in a collision even*. 2000.
- [13] RIGO Ph., ‘*L’optimisation des structures navales - Minimisation du coût de construction de la coque métallique*. 2002.
- [14] RIGO Ph., ‘*Voies navigables et constructions hydrauliques*. Support de cours - Université de Liège - 2010.
- [15] SIMONSEN BC. , OCAKLI H., *Experiments and theory on deck girder crushing*. Thin-Walled Struct 1999 ;34 :195e216.
- [16] SIMONSEN BC, *Ship grounding on rock*. I. Theory. Mar Struct 1999 ;10 :519e22.
- [17] WIERZBICKI T., CULBERTSON-DRISCOLLJ. , *Crushing damage of web girders under localized static loads*. J Constr Steel Res 1995 ; 33 :199e235
- [18] YAMADA Y., PEDERSON PT., *A benchmark study of procedures for analysis of axial crushing of bulbous bows*. Mar Struct 2008 ; 21 :257e93.
- [19] ZANG SM., *The mechanics of ship collisions*. Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark ; 1999.