



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE
MASTER EN INGÉNIEUR CIVIL DES CONSTRUCTIONS

Intérêt des aciers laminés à haute limite d'élasticité dans le domaine de la construction métallique.

Loris SAUFNAY

Membres du jury :

Jean-François DEMONCEAU (ULiège)
Jean-Pierre JASPART (ULiège)
Laurent DUCHÊNE (ULiège)
Teodora BOGDAN (ArcelorMittal)

Année académique 2018-2019

Table des matières

Remerciements	1
Enoncé du travail	2
Résumé du travail	3
1 Introduction	5
2 Mise en situation	7
2.1 Evolution de l'utilisation de l'acier	7
2.2 Avantages & inconvénients de ce type de nuances	8
2.3 Propriétés structurelles de ces aciers	10
2.4 Etude de l'intérêt économique des tubes à haute limite d'élasticité préalablement réalisée	12
3 Méthodologie	13
3.1 Structure du travail	13
3.2 Détermination des intervalles de charges et de longueurs à considérer	15
3.3 Dénomination des différentes nuances considérées	17
3.4 Evaluation de l'éventuel intérêt de la nuance HSS	17
4 Etude Locale	21
4.1 Eléments tendus	21
4.1.1 Simulations numériques	22
4.1.2 Résultats	23
4.1.3 Comparaisons	25
4.1.4 Méthodes pour déterminer l'intérêt économique de la nuance HSS	29
4.2 Eléments comprimés	32
4.2.1 Simulations numériques	33
4.2.2 Résultats	34
4.2.3 Comparaisons	37
4.2.4 Etablissement d'un critère limite d'utilisation d'un profilé	43
4.2.5 Méthodes d'évaluation de l'intérêt économique d'une nuance HSS	45
4.3 Eléments fléchis	48
4.3.1 Simulations numériques	49

4.3.2	Résultats pour des poutres secondaires bi-appuyées (isostatiques)	50
4.3.3	Résultats pour des poutres secondaires bi-encastrées (hyperstatiques) . . .	57
4.3.4	Comparaisons de paramètres réalisées pour les poutres secondaires	63
4.3.5	Résultats pour les poutres primaires bi-appuyées (isostatiques)	73
4.3.6	Résultats pour les poutres primaires bi-encastrées (hypertstatiques)	76
4.3.7	Etablissement d'un critère limite d'utilisation d'un profilé	80
4.3.8	Méthodes d'évaluation de l'intérêt d'une nuance HSS	81
4.4	Eléments comprimés-fléchis	84
4.4.1	Simulations numériques	85
4.4.2	Résultats	86
4.4.3	Comparaisons	95
4.4.4	Méthodes d'évaluation de l'intérêt d'une nuance HSS	102
5	Etude économique	107
5.1	Eléments en traction pure	109
5.2	Eléments en compression pure	111
5.3	Eléments en flexion pure	112
5.3.1	Poutres secondaires	113
5.3.2	Poutres primaires	117
5.3.3	Intérêt du cintrage	121
5.4	Eléments comprimés-fléchis	125
5.4.1	Flambement dans le plan et déversement empêché	125
5.4.2	Flambement dans l'espace et déversement empêché	126
5.4.3	Flambement dans l'espace et déversement libre	127
6	Conclusions	129
	Références	131
	Annexe A Eléments tendus	133
	Annexe B Eléments comprimés	135
	Annexe C Eléments fléchis	140
C.1	Poutres secondaires bi-appuyées	140
C.2	Poutres secondaires bi-encastrées	144
C.3	Poutres primaires bi-appuyées	148
C.4	Poutres primaires bi-encastrées	152
	Annexe D Eléments comprimés-fléchis	157
D.1	Flambement dans le plan (selon y) et sans déversement	157
D.2	Flambement dans l'espace (selon y et z) et sans déversement	165
D.3	Flambement dans l'espace (selon y et z) et avec déversement	173

Remerciements

A l'occasion de la remise de ce travail de fin d'études, je tiens à remercier mes proches et plus particulièrement mes parents pour leur soutien inébranlable tout au long de mon parcours universitaire. L'entourage a eu pour moi un rôle très important dans la réussite de ces études.

Je remercie également mes promoteurs Mr. Jean-François Demonceau et Mr. Jean-Pierre Jaspard pour m'avoir soutenu et aiguillé tout au long du travail. Leur disponibilité et leur pertinence professionnelle m'ont permis de traverser les différentes étapes de ce travail.

Enfin, je remercie également les deux autres membres du jury, Mme. Teodora Bogdan et Mr. Laurent Duchêne pour les diverses interactions que j'ai pu avoir avec eux durant ces quelques mois.

Loris Saufnay

Intérêt des aciers laminés à hautes limites d'élasticité dans le domaine de la construction métallique.

SAUFNAY Loris

Ces dernières années, de nouveaux matériaux dits "à hautes performances" sont apparus sur le marché, comme notamment les aciers à hautes limites d'élasticité. En effet, de nos jours, les sidérurgistes sont capables de produire des aciers de très hautes performances grâce à de nouveaux procédés de production toujours plus performants. On retrouve notamment parmi ceux-ci des "aciers à hautes limites d'élasticité", dont la limite d'élasticité est supérieure à 460 MPa.

Cependant, l'ingénieur/concepteur est parfois réticent à leur utilisation car il dispose de très peu d'informations quant à l'intérêt technique et/ou économique de leur utilisation dans le domaine du génie civil en général et dans le domaine des bâtiments en particulier.

Les aciers à hautes résistances ont, dans certain cas, un intérêt économique pour la simple et bonne raison que l'utilisation de ces aciers conduit à une réduction de matières premières dans de nombreux cas. En effet, une structure réalisée avec des aciers à hautes résistances est toujours plus légère puisqu'un profilé de même dimension est capable de reprendre des charges plus grandes. C'est un avantage puisque la réduction du poids entraîne une réduction des coûts que ce soient les coûts de matières premières, de transport ou encore de fabrication. Malheureusement, dans des cas où les états limites de service gouvernent le dimensionnement des éléments, les aciers hautes performances n'ont plus d'intérêt puisque les critères de flèches/vibrations sont indépendants de la limite d'élasticité du matériau.

Des recherches sur le sujet ont déjà été réalisées à l'université de Liège. Ces recherches concernaient l'étude de l'intérêt économique des tubes métalliques à hautes résistances dans le domaine de la construction métallique et mixte acier-béton. L'objectif du travail est de prolonger cette étude en identifiant des domaines d'utilisation pour lesquels les profilés laminés à hautes limites d'élasticité auraient un intérêt économique dans le domaine de la construction métallique.

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, des études analytiques et numériques vont être réalisées pour des éléments simples (étude locale); ensuite une étude économique sera réalisée afin d'analyser l'influence du coût sur les domaines d'intérêt pour l'utilisation de ce type d'éléments constructifs.

Membres du jury:

J-F. Demonceau

J-P. Jaspart

L. Duchêne

T. Bogdan

Résumé du travail

Ce travail de fin d'études consiste en l'étude de l'intérêt économique de profilés laminés à haute limite d'élasticité ($f_y > 460MPa$) dans le domaine de la construction métallique. De nos jours, les sidérurgistes sont capables de produire des aciers toujours plus résistants grâce à des procédés de production toujours plus performants. L'utilisation des aciers à haute limite d'élasticité peut conduire à une réduction significative du poids de la structure métallique. Une structure plus légère requiert des fondations plus petites, des coûts de transport et de construction plus faibles mais aussi émet moins de CO_2 . Cependant, certaines conditions comme les limites de flèches, les instabilités ou la fatigue réduisent considérablement l'avantage de ces aciers. C'est pour cette raison que le concepteur est parfois réticent à leur utilisation. Une étude établissant les domaines d'intérêt économique des tubes métalliques à haute limite d'élasticité dans la construction métallique et mixte avait déjà été réalisée à l'Université de Liège. L'objectif de ce travail est de prolonger cette étude pour les profilés laminés à haute limite d'élasticité. En particulier, ce travail fournit des méthodes afin que le concepteur puisse déterminer l'intérêt d'une nuance d'acier à haute limite d'élasticité pour toute une série d'éléments structuraux soumis à différentes sollicitations. Ces méthodes sont alors utilisées afin de déterminer les domaines d'intérêt pour les aciers à haute limite d'élasticité en fonction de l'évolution du coût relatif de ces aciers.

Abstract

The present work aims at studying the field of interest of high strength steel rolled sections ($f_y > 460MPa$) for steel structures from an economical point of view. Nowadays, steelmakers are able to produce more resistant steels through more efficient production processes. The use of this kind of steels can lead to a significant material saving. So, the use of high strength steel leads to lighter structures requiring smaller foundations, lower transportation and construction costs but also emitting less CO_2 . However, buckling, fatigue or deflection requirements often reduce the advantage of high strength steels. It is for this reason that the designer is sometimes reluctant to use them. A study establishing the areas of economic interest of high strength steel tubes in steel and composite structures had already been carried out at the University of Liège. The goal of this work is to extend this study to rolled sections (H-shape and I-shape). This work therefore consists in providing methods in order to help the designer determining the economical interest of his high strength steel for structural elements subjected to different loadings. These methods are, then, used to determinate the areas of economic interest of the high strength steels depending on their relative costs.

Chapitre 1

Introduction

Ces dernières années, de nouveaux aciers dits "à haute limite d'élasticité" ($f_y > 460MPa$) sont apparus sur le marché. Le développement de nouvelles technologies de production toujours plus performantes permet d'accroître constamment la limite d'élasticité de l'acier.

Ces aciers sont, de nos jours, largement utilisés pour les ponts et les constructions (notamment au Japon ou aux USA) [6]. Cependant, en Europe, leur application dans les bâtiments reste relativement restreinte bien qu'ils soient de plus en plus utilisés dans la construction de ponts.

Ces aciers à haute limite d'élasticité présentent divers avantages tels que la diminution des dimensions des éléments, l'esthétique (structures toujours plus élancées), l'intérêt environnemental (moins de matière première utilisée), les coûts de transport et de construction plus faibles, les fondations plus petites étant donné que les structures sont moins lourdes,...

Bien que ces différents avantages soient connus, il existe malheureusement des phénomènes allant à l'encontre de l'intérêt économique de l'utilisation de ces aciers comme :

- Les structures réalisées en acier à haute limite d'élasticité nécessitent des sections plus petites pour reprendre les mêmes niveaux de chargement. Ces structures sont donc plus élancées, la prise en compte des instabilités diminue donc considérablement la résistance en section des éléments. Si l'élancement est suffisamment grand, la pénalisation de résistance due aux instabilités sera telle que les sections seront identiques que ce soit pour un acier "standard" ou "à haute limite d'élasticité".
- Ces structures faites d'aciers à haute limite d'élasticité étant plus légères et donc plus souples à fortiori, les états limites de service ELS (flèches et vibrations) seront donc d'autant plus déterminants. Or, les critères aux ELS sont indépendants de la limite d'élasticité du matériau utilisé, ils limitent donc l'intérêt économique de ce type d'acier dans les domaines où ils gouvernent le dimensionnement.

Connaissant ces phénomènes, les concepteurs sont donc parfois réticents à leur utilisation.

L'objectif de ce travail est de fournir à l'utilisateur des outils afin de déterminer si la nuance d'acier à haute limite d'élasticité qu'il considère a un intérêt économique.

Cette thématique avait déjà été abordée dans le cadre d'un travail de recherche réalisé par l'Université de Liège sur l'intérêt économique des tubes métalliques à haute limite d'élasticité dans la construction métallique et mixte acier-béton. Cet article constitue le point de départ de cette étude.

La démarche adoptée dans le cadre de ce travail consiste en la réalisation de simulations numériques afin de comparer les différentes nuances d'acier entre elles et déterminer ainsi les domaines dans lesquels ces aciers à haute limite d'élasticité présentent un intérêt économique.

La suite de ce travail de fin d'études est structurée de la manière suivante :

1. **Mise en situation** : ce chapitre fera état de ce qui est connu, à l'heure actuelle, sur la thématique de ce travail.
2. **Méthodologie** : ce chapitre permettra de faciliter la compréhension du travail.
3. **Etude locale** : ce chapitre constitue la partie la plus importante du travail à savoir l'étude de l'intérêt des aciers à haute limite d'élasticité sur des éléments simples.
4. **Etude économique** : ce chapitre permettra d'étudier l'influence du coût relatif des aciers à haute limite d'élasticité sur les résultats obtenus lors de l'étude locale.
5. **Conclusions**
6. **Annexes**

Chapitre 2

Mise en situation

Ce chapitre a pour objectif de faire état des connaissances sur les aciers hautes performances. Il permettra de localiser les nuances dites "à haute limite d'élasticité" dans l'évolution temporelle de l'utilisation des nuances d'acier existantes. Les déterminations des avantages/inconvénients et des diverses propriétés de ce type de nuances d'acier seront également établies. Finalement, les observations et les conclusions d'un article ayant été réalisé à l'Université de Liège sur un sujet complémentaire à la thématique de ce travail seront abordées.

2.1 Evolution de l'utilisation de l'acier

Ces dernières années, il y a une tendance croissante à propos de l'utilisation des aciers à haute limite d'élasticité. De nos jours, de nouveaux procédés de fabrication innovants permettent de produire des aciers toujours plus résistants. Il y a une vingtaine d'années, les nuances S235 ou S275 était la norme, à l'heure actuelle le S355 est le plus couramment utilisé et des nuances plus élevées existent déjà [5]. Ce type d'acier est de plus en plus utilisé comme pour les bâtiments de grande hauteur ($\approx S460$), pour la construction d'ouvrages d'art tel que le viaduc de Millau ($\approx S460$) ou pour les conduites forcées ($\approx S700$) par exemple [8]. L'évolution des nuances d'aciers laminés est reprise à la FIGURE 2.1.

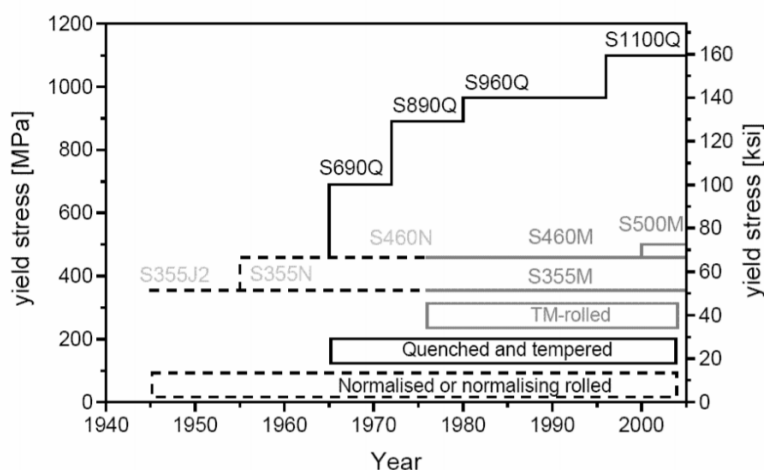


FIGURE 2.1 – Evolution des nuances d'aciers laminés (plats) au cours du temps [7].

Comme le montre la FIGURE 2.1, l'augmentation de la limite d'élasticité des aciers est due à l'apparition de nouveaux processus de fabrication tels que le traitement thermique "trempe et revenu" ou encore le laminage thermo-mécanique. La FIGURE 2.2 reprend les caractéristiques des différentes nuances actuelles.

Aciers	Nuance	f_y [MPa]	f_u [MPa]	Elongation à la rupture [%]
« Standards »	S235	235	360	28
	S275	275	430	22
	S355	355	510	22
	S460	460	540	17
Haute Limite d'Elasticité	S500	500	590	17
	S550	550	640	16
	S620	620	700	15
	S690	690	770	14
Très Haute Limite d'Elasticité	S890	890	940-1100	11
	S960	960	980-1150	10
	S1100	Valeurs non standardisées		

FIGURE 2.2 – Catégorisation des différentes nuances d'acier d'après la prEN 1993-1-1 [12] [11].

A l'heure actuelle, les plats sont commercialisés et standardisés jusqu'à S960 tandis que les profilés laminés ne sont commercialisés que jusqu'à S460. Ceci s'explique par des raisons de fabrication d'une part mais également par le fait que l'Eurocode 3 ne considère que les nuances jusqu'à S460. Néanmoins, la partie 1-1 de la nouvelle version de l'Eurocode 3 couvre des aciers jusqu'à S700. Il n'est pas impossible que, dans quelques années, lorsque les normes actuelles seront révisées, elles couvriront même jusqu'à la nuance d'acier S960.

Cela laisse donc présager la commercialisation de profilés laminés à haute limite d'élasticité dans un futur relativement proche. L'étude de l'intérêt de ces aciers à haute limite d'élasticité dans la construction métallique prend donc tout son sens.

2.2 Avantages & inconvénients de ce type de nuances

Les aciers à haute limite d'élasticité peuvent être utilisés dans les bâtiments pour diverses raisons [10] :

1. Minimiser les matériaux de construction donc la quantité de matière première utilisée. Cela permet la préservation des ressources minérales (raison écologique).
2. Pour des raisons d'esthétisme, les structures utilisant des aciers à haute limite d'élasticité sont plus élancées.
3. Structures plus légères dans leur globalité, elles nécessitent donc des fondations plus petites.
4. Coûts de transport et de fabrication moins onéreux et coûts de protection vis-à-vis de la corrosion plus faibles également.
5. Maximiser le nombre d'étages pour une hauteur de bâtiment donnée.
6. Maximiser la surface exploitable de chaque étage (réduction de la section des colonnes en utilisant ces nuances d'acier).

7. Plus les bâtiments sont hauts, plus les charges verticales à reprendre par les colonnes sont importantes. Les colonnes à haute limite d'élasticité sont capables de reprendre des efforts plus grands tout en gardant la même quantité de matière utilisée, voire en la diminuant. Cela permet de répondre à la demande de résistance supplémentaire actuelle étant donné que nous sommes dans une époque où on veut construire toujours plus haut.
8. Dans les treillis, tous les éléments sont soumis à des efforts axiaux. La résistance des aciers à haute limite d'élasticité peut être totalement exploitée dans les membrures tendues puisque celles-ci ne sont pas sujettes à quelconques instabilités.

En ce qui concerne les **inconvénients** de ce type d'acier, ceux-ci sont les suivants [10] :

1. Le risque d'instabilités (voilement, flambement, déversement, voilement par cisaillement, . . .) est plus grand car les éléments ont tendance à être plus élancés. La réduction de la résistance en section sera donc plus grande pour les aciers à haute limite d'élasticité que pour les aciers standards. Cela limitera donc l'intérêt de l'utilisation de ces aciers. Il est à noter que des courbes européennes de flambement spécifiques ont été définies dans la partie 1-1 de la nouvelle version de l'Eurocode 3 [12]. Cependant, les mêmes courbes sont utilisées pour le déversement que ce soit pour les nuances standards ou que ce soit pour les nuances à hautes performances.
2. Le fait que les constructions soient plus légères et plus souples entraîne des problèmes de flèches et de vibrations. Néanmoins, le module de déformabilité (module de Young) reste identique peu importe la limite d'élasticité considérée. Ceci est, en réalité, dû au fait que les structures en acier à hautes performances utilisent moins de matière et sont donc plus souples. Cette propriété rend les conditions limites de service plus dimensionnantes, en particulier les problèmes de flèches et de vibrations. Or, ces conditions limites de service sont indépendantes de la limite d'élasticité du matériau utilisé. Cela limite donc l'intérêt des aciers à haute limite d'élasticité. Des solutions pour s'affranchir de cette contrainte qui restreint l'intérêt des aciers à haute limite d'élasticité existent telle que par exemple, le cintrage des poutres pour limiter les problèmes de flèches.
3. Les conditions de fatigue sont plus critiques pour les structures faites en acier à haute limite d'élasticité. La résistance à la fatigue n'augmente pas de la même façon que la résistance de la matière. Les procédures de soudage doivent être contrôlées attentivement.
4. La ductilité est également réduite pour les aciers à haute limite d'élasticité. En effet, plus la limite d'élasticité de l'acier est élevée plus le rapport f_y/f_u est grand. Les critères nécessitant d'être vérifiés seront explicités dans la section suivante relative aux propriétés de ces aciers.
5. Les aciers à haute limite d'élasticité possèdent une ténacité réduite, les matériaux doivent cependant avoir une ténacité suffisante pour éviter la rupture fragile à la température de service la plus basse.

2.3 Propriétés structurales de ces aciers

Le diagramme contraintes-déformations de la nuance S690 est comparé à celui de nuances plus standards comme la nuance S235, S355 ou S460 (FIGURE 2.3).

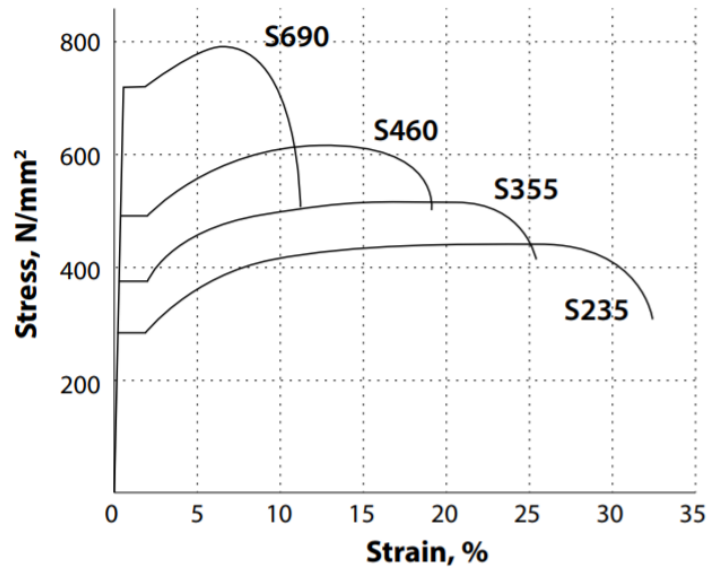


FIGURE 2.3 – Diagrammes contraintes-déformations des nuances S235, S355, S460 et S690 [5].

Cette FIGURE 2.3 démontre le fait que plus la limite d'élasticité de l'acier est importante, plus le ratio f_u/f_y est faible. Autrement dit, plus la limite d'élasticité augmente plus la ductilité du matériau diminue. Divers critères comme notamment la ductilité doivent effectivement être vérifiés par ces nouvelles nuances d'acier.

Conformément à la nouvelle version de l'Eurocode 3 ([12]), les différents requis des aciers structurels sont :

1. Résistance :

La limite d'élasticité et la limite ultime sont déterminées soit sur base de la norme produit correspondante soit en utilisant le tableau 5.1 de la nouvelle version de l'Eurocode 3 partie 1-1 [12].

2. Ductilité suffisante :

Les critères pour réaliser une analyse plastique (ductilité suffisante) provenant de l'ancienne norme EN 1993-1-1 [1] (considérant les nuances jusqu'à S460) sont :

- $f_u/f_y > 1.1$
- L'élongation à la rupture ne peut être inférieure à 15%
- $\epsilon_u > 15f_y/E$

L'article [10] fournit la FIGURE 2.4 suivante.

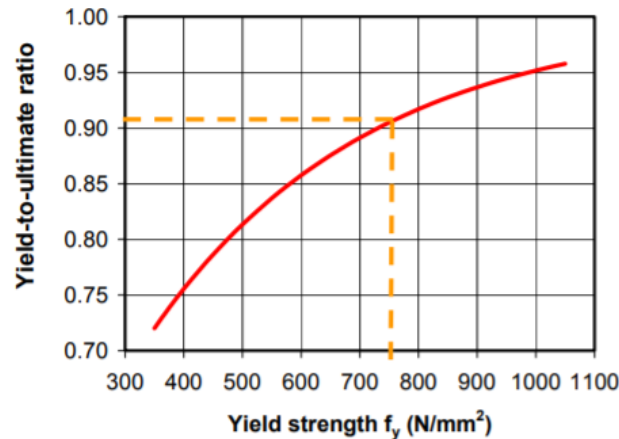


FIGURE 2.4 – Augmentation du rapport entre la limite d'élasticité et la limite ultime avec la résistance de l'acier.

Grâce à cette FIGURE 2.4, on peut par exemple déterminer que l'analyse plastique est réalisable pour des nuances jusqu'à approximativement S750 (pour $f_u/f_y > 1.1$ on a $f_y/f_u < 0.91$ et donc $f_y \approx 750 \text{ N/mm}^2$). Cependant, le critère sur l'élongation ne permet pas d'aller aussi loin dans les limites d'élasticité comme on peut le voir en regardant les élongations de chaque acier de la FIGURE 2.2.

Pour les aciers à haute limite d'élasticité, la nouvelle norme prEN 1993-1-1 [12] permet de rendre les critères de ductilité plus souples à savoir :

- $f_u/f_y > 1.05$
- L'élongation à la rupture ne peut être inférieure à 12%

L'ancienne norme ne permettait donc pas d'analyse plastique pour les aciers à haute limite d'élasticité tandis que le nouvelle accepte l'analyse plastique pour autant que ces aciers vérifient les critères de l'ancienne norme. La norme produit EN 10025 prescrit déjà des aciers laminés jusqu'à S690. Il est donc possible d'envisager que ces critères soient validés pour des profilés laminés à haute limite d'élasticité quand ces derniers seront commercialisés.

3. Ténacité :

Les matériaux doivent avoir une ténacité suffisante pour éviter la rupture fragile à la température de service la plus basse. D'autres critères pour la rupture fragile peuvent être omis si les conditions de l'Eurocode 3 partie 1-10 sont vérifiées aux températures les plus basses. Pour les éléments en compression, une propriété de ténacité minimale doit être sélectionnée ($\sigma_{ed} = 0.25 \cdot f_y(t)$).

4. Soudabilité : Les critères de soudabilité doivent vérifier la norme produit EN 10025.

2.4 Etude de l'intérêt économique des tubes à haute limite d'élasticité préalablement réalisée

Préalablement réalisée à l'Université de Liège, cette étude de l'intérêt des aciers à haute limite d'élasticité pour des tubes métalliques et mixtes constituait le point de départ de ce travail de fin d'études ([14]). Cette étude consistait à comparer au point de vue économique l'utilisation d'un acier dit "standard" (S355) et celle d'un acier dit "à haute limite d'élasticité" (S500, S550, S620 ou S690). Cette comparaison était basée sur le design optimal des sections en prenant en compte toutes les règles relatives de l'Eurocode 3 et 4.

Les comparaisons étaient réalisées à l'aide d'algorithmes développés pour le travail permettant de couvrir de grandes gammes de valeurs. Les investigations ciblaient les colonnes simples et les colonnes issues de portiques à noeuds transversalement déplaçables ou non transversalement déplaçables.

Ce travail avait permis de fournir des diagrammes déterminant dans quelles gammes de valeurs de longueurs et de charges les aciers à haute limite d'élasticité avaient un intérêt économique. Grâce à ces diagrammes établis, le concepteur est capable de déterminer pour sa colonne tubulaire le rapport entre l'aire requise pour l'acier "standard" et celle de l'acier "à haute limite d'élasticité". Il connaîtra ainsi le domaine d'intérêt en fonction du coût relatif des nuances à haute limite d'élasticité. Les différentes conclusions fondamentales de ce travail étaient les suivantes :

- Les colonnes trapues présentent des domaines d'intérêt des aciers à haute limite d'élasticité plus larges que les colonnes élancées. Les instabilités (flambement en l'occurrence) limitent donc bien l'intérêt économique de ces aciers.
- L'intérêt des aciers à haute limite d'élasticité décroît plus l'excentricité de la charge axiale augmente.
- Le domaine d'intérêt de ces aciers est plus large pour les portiques à noeuds non transversalement déplaçables que pour le cas des portiques à noeuds transversalement déplaçables. Cela provient du fait que lorsque les structures sont à noeuds transversalement déplaçables, les effets du second ordre et les états limites de service (ELS) diminuent considérablement l'intérêt de ces aciers à haute limite d'élasticité. Ces derniers étant indépendants de la limite d'élasticité du matériau.

Ce travail concluait en spécifiant qu'une suite éventuelle du travail serait d'investiguer l'intérêt de ce type d'aciers pour des profilés laminés (sections en H ou en I) en utilisant une méthodologie analogue. C'est donc l'objectif de ce travail de fin d'études et la méthodologie utilisée est explicitée dans le prochain chapitre.

Chapitre 3

Méthodologie

Au travers de ce chapitre, la méthodologie du travail va être explicitée afin de faciliter la compréhension de celui-ci.

3.1 Structure du travail

Tout d'abord, l'étude va se focaliser sur l'analyse d'éléments indépendants d'une structure, c'est-à-dire dans un premier temps sur la détermination des domaines pour lesquels les aciers à haute limite d'élasticité ($f_y \in [500 ; 690]$ MPa) ont un intérêt économique par rapport à la nuance standard (S355) pour des éléments isolés extraits d'une structure (étude locale). Dans les faits, un ensemble d'éléments avec diverses conditions d'appuis vont être étudiés. Les différents types de chargement, du plus simple au plus compliqué, seront considérés ; à savoir des éléments : en traction pure, en compression pure, en flexion pure et comprimé-fléchi. Les différents cas qui vont être étudiés lors de l'étude locale sont les suivants :

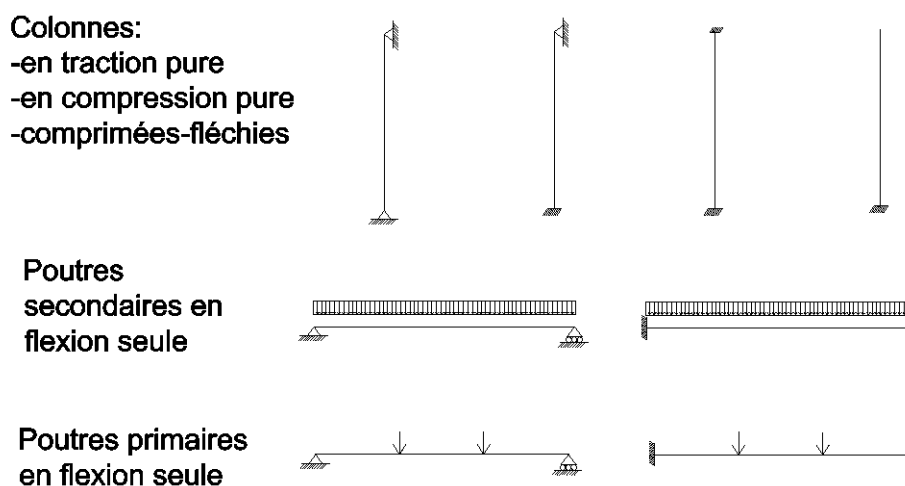


FIGURE 3.1 – Différents cas étudiés dans le cadre de l'étude locale de ce travail.

Il est à préciser que seuls les profilés laminés seront étudiés dans le cadre de ce travail de fin d'études. Les différentes propriétés des profilés laminés considérés ont été importées dans

MATLAB grâce au catalogue ArcelorMittal, sous format excel fourni sur le site internet de l'entreprise ([2]).

Ensuite, l'influence du coût relatif considéré selon la nuance sur les résultats sera abordé dans un chapitre qui lui sera consacré.

Pour ce faire, des études analytiques, mais surtout numériques, vont être réalisées. La structure générale des codes qui vont être implémentés est la suivante :

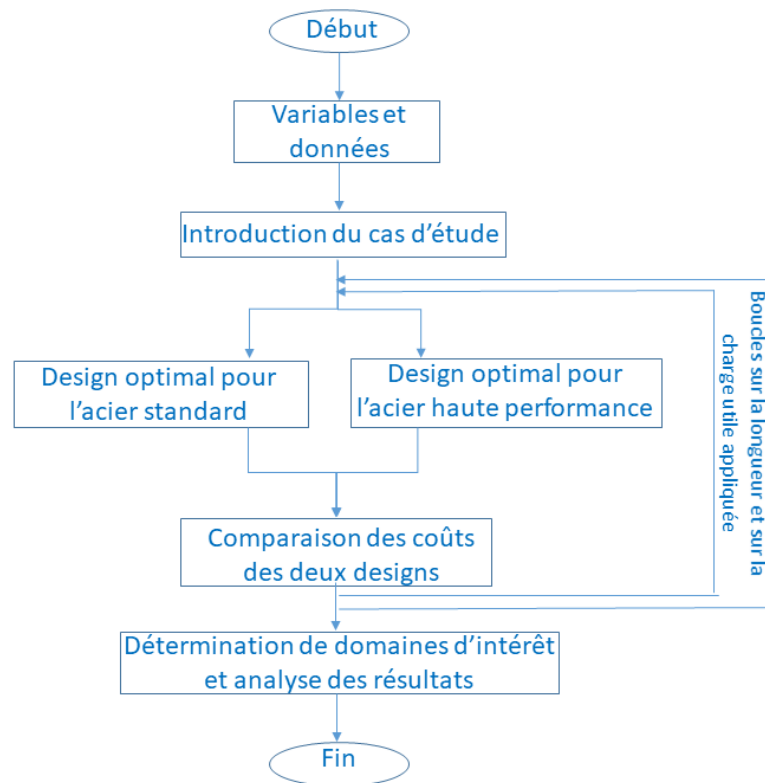


FIGURE 3.2 – Organigramme général des codes.

Comme illustré dans la FIGURE 3.2, pour chaque configuration, les designs optimaux pour la nuance "à haute limite d'élasticité" et celui pour la nuance "standard" vont être réalisés. Ensuite, sur base des résultats obtenus, une comparaison des coûts sera effectuée afin de justifier l'intérêt ou pas de l'acier haute performance dans tous les cas. Enfin, les résultats seront analysés afin de dégager des conclusions sur les domaines d'intérêt économique obtenus.

Les designs sont basés sur les règles de l'ancienne [1] et de la nouvelle version [12] de l'Eurocode 3 partie 1-1 en particulier puisque cette dernière couvre les aciers à haute limite d'élasticité jusqu'à S700.

Pour chaque configuration, l'étude des différents paramètres sera réalisée afin de bien comprendre l'impact de chacun d'eux sur les résultats obtenus.

Enfin, il est à noter que l'ensemble des codes qui ont été implémentés dans le cadre de ce travail

ont été vérifiés par des calculs à la main afin de s'assurer de la fiabilité de ces derniers.

3.2 Détermination des intervalles de charges et de longueurs à considérer

Une des premières choses qu'il était nécessaire de fixer, ce sont les intervalles de charges raisonnables ainsi que des longueurs pour lesquelles l'intérêt des aciers à haute limite d'élasticité allait être étudié.

Pour ce faire, les guides réalisés dans le cadre du projet européen « Faciliter le développement du marché des profilés laminés pour les halls industriels et les bâtiments de faible hauteur » ont été utilisés. Ce projet porte le nom de SECHALO [3].

Le projet SECHALO est un ensemble de manuels des meilleures pratiques de conception. Ils consistent en une série de guides techniques destinés aux bureaux d'ingénierie, aux constructeurs métalliques et aux architectes. Ils ont pour objectif de faciliter l'application des Eurocodes à la conception de bâtiments en acier à un ou plusieurs étages [3].

En particulier, la partie IV [4] fait référence à la conception détaillée des ossatures métalliques. Ce document va permettre d'établir des portées et des actions courantes afin de structurer l'étude de l'intérêt des aciers hautes performances dans le domaine de la construction métallique.

Sur base de ce guide, considérons le plan d'étage repris à la FIGURE 3.3 suivante.

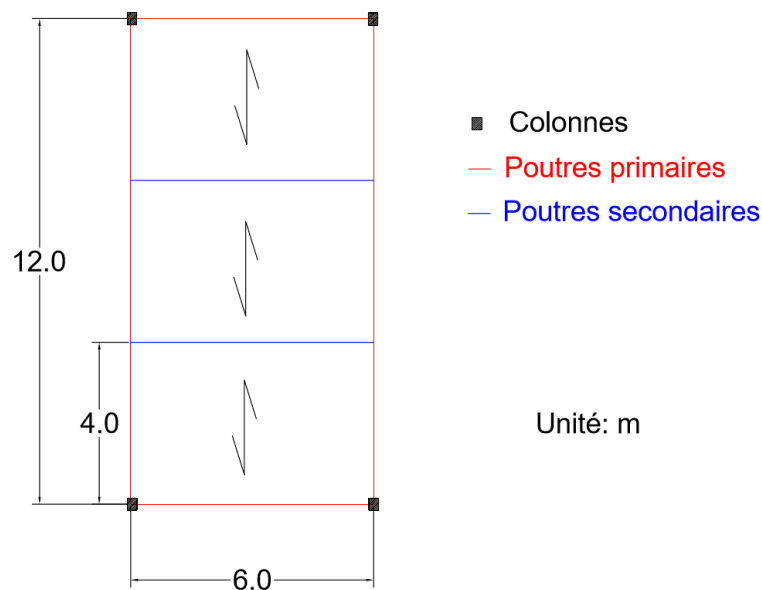


FIGURE 3.3 – Plan d'étage considéré.

Les charges ayant été considérées sont les suivantes :

- Poids propre d'un hourdis BA 13+4cm de chape de compression=300kg/m²
- Charges permanentes=200kg/m²
- Charges d'exploitations (variables)=200kg/m²
- Charge surfacique prenant en compte d'éventuels changements de positionnement des cloisons non-portantes=100kg/m²
- Poids propre de l'élément : $\approx 50kg/m$

Il est à noter que le poids des cloisons périphériques est directement pris en compte dans les charges permanentes. Il n'y a donc pas lieu de rajouter une quelconque charge pour ces dernières.

Connaissant les charges appliquées, il est assez aisé de connaître les charges réparties s'appliquant sur les poutres et la charge ponctuelle appliquée sur la colonne.

— Charges réparties appliquées sur les poutres secondaires :

$$q = (300 + 200) \cdot 1.35 \cdot \frac{4}{2} \cdot 2 + (200 + 100) \cdot 1.5 \cdot \frac{4}{2} \cdot 2 + 50 \cdot 1.35 = 4567.5kg/m = 45.675kN/m$$

— Charges réparties appliquées sur les poutres primaires de 6m :

$$q = (300 + 200) \cdot 1.35 \cdot \frac{4}{2} + (200 + 100) \cdot 1.5 \cdot \frac{4}{2} + 50 \cdot 1.35 = 2317.5kg/m = 23.175kN/m$$

— Charges concentrées appliquées sur les poutres primaires de 12m :

$$F = 45.675 \cdot \frac{6}{2} = 137.025kN$$

— Charges concentrées appliquées sur les colonnes :

$$R = 23.175 \cdot \frac{6}{2} + 137.025 = 206.55kN$$

Les différents intervalles de charges qui vont être considérés dans le cadre de ce travail sont les suivants :

- Charges réparties appliquées sur les poutres : $q_{ed} \in [1 \ 100] \text{ kN/m}$
- Charges ponctuelles appliquées sur les poutres primaires $R_{ed} \in [50 \ 300]kN$
- Charges ponctuelles appliquées sur les colonnes inférieures (en considérant un immeuble de maximum 15 étages comme celui présenté) : $N_{ed} \in [300 \ 3000]kN$

Il est à noter que les bornes limites de ces intervalles vont largement au delà des charges calculées précédemment. Ceci afin de prendre en compte des portées ou des charges appliquées plus importantes que celles considérées. Ces charges seront considérées telles quelles lors des vérifications des éléments aux états limites ultimes (ELU) puisque celles-ci sont pondérées. A l'inverse, ces charges seront divisées par un coefficient de sécurité moyen de 1.4 lors des vérifica-

tions aux états limites de service (ELS).

Cependant, au travers des futures études, la constatation suivante sera observée : plus la massivité de la gamme de profils considérée est élevée moins il y aura d'intérêt dans le domaine considéré. Cela vient du fait que certains profils tels que les profils HD par exemple ont été conçus pour reprendre des charges bien supérieures aux profils de type HEA et HEB. En effet, les intervalles de charges mentionnés ci-dessus correspondent à des charges de bâtiments normaux. Lorsque les charges deviennent plus élevées, les profils du type HEA, HEB sont laissés de côté au profit de profils plus massifs comme des HEM ou HD. Il conviendra donc de relativiser les résultats observés car ce n'est pas parce que ces profils HEM, HD présenteront moins d'intérêt de la nuance à haute limite d'élasticité pour l'intervalle de charges considéré qu'ils n'en présenteront pas pour des charges bien supérieures.

C'est également pour cette raison que les résultats seront toujours portés sur une seule gamme de profils à la fois. En effet, il faudrait considérer un intervalle de charges infini pour pouvoir comparer toutes les gammes ensemble. De plus, la superposition des résultats engendrée par la considération de plusieurs gammes de profils nuit à l'interprétation des résultats obtenus.

Les différents intervalles de longueurs considérés, quant-à-eux, sont fixés de la façon suivante :

- Longueurs des colonnes : $L \in [1 \ 8] \text{ m}$
- Longueurs des poutres secondaires : $L \in [2 \ 12] \text{ m}$
- Longueurs des poutres primaires : $L \in [2 \ 18] \text{ m}$

3.3 Dénomination des différentes nuances considérées

Tout au long de ce rapport, la dénomination suivante sera adoptée pour les aciers considérés.

- RS : "Regular steel" correspond aux nuances entre S235 et S460 comprise. Dans le cadre de ce travail, seule la nuance S355 sera considérée pour la comparaison puisque c'est celle la plus communément utilisée de nos jours.
- HSS : "High strength steel" correspond à des nuances supérieures à S460. Dans le cadre de ce travail, les nuances S500, S550, S620 et S690 seront comparées à la nuance RS.
- UHSS : "Ultra high strength steel" correspond à toutes les nuances supérieures à S690. Ces nuances ne seront pas considérées au cours de ce travail.

3.4 Evaluation de l'éventuel intérêt de la nuance HSS

Pour chaque type de chargement, l'étude de l'intérêt sera basée sur le design du profilé optimal pour les deux nuances d'acier considérées, comme expliqué précédemment. Ensuite, une

comparaison des coûts entre les deux profilés optimaux sera réalisée afin de justifier de l'intérêt ou non de la nuance HSS. Il est à noter que les coûts sont déterminés de la façon suivante :

$$\text{Coût} = \text{Poids/m} \cdot L \cdot \text{Prix au kg} \quad (3.1)$$

La comparaison des coûts est déterminée en calculant le rapport des coûts $\frac{C_{HSS}}{C_{RS}}$. Il est ainsi aisé de déterminer si pour chaque couple (charge, longueur) il y a un intérêt ou non de la façon suivante.

- $\frac{C_{HSS}}{C_{RS}} < 1$: il y a un intérêt de passer à de l'acier HSS.
- $\frac{C_{HSS}}{C_{RS}} \geq 1$: il n'y a pas d'intérêt de passer à de l'acier HSS.

En développant quelque peu les relations ci-dessus, un critère d'intérêt pour les nuances HSS peut être établi, à savoir :

$$\frac{C_{HSS}}{C_{RS}} = \frac{G_{\text{Profile HSS}} \cdot \mathcal{L} \cdot c_{HSS}}{G_{\text{Profile RS}} \cdot \mathcal{L} \cdot c_{RS}} < 1$$

où $\frac{c_{HSS}}{c_{RS}}$ est le coût relatif de la nuance HSS par rapport à la nuance RS et $G = \text{Poids/m}$ du profilé. Les coûts relatifs de référence des différentes nuances HSS étudiées seront fixés à la TABLE 3.1. La relation peut-être réécrite comme ;

$$\frac{C_{HSS}}{C_{RS}} = \frac{A_{\text{Profile HSS}} \cdot \mathcal{A} \cdot c_{HSS}}{A_{\text{Profile RS}} \cdot \mathcal{A} \cdot c_{RS}} < 1$$

On obtient donc, le premier critère fondamental à savoir :

$$\boxed{\frac{G_{RS}}{G_{HSS}} = \frac{A_{RS}}{A_{HSS}} > \frac{c_{HSS}}{c_{RS}}} \quad (3.2)$$

Sur base de cette nouvelle relation obtenue, il va être possible d'expliquer l'ensemble des résultats qui vont être obtenus dans la suite du rapport.

Les rapports de coûts unitaires (prix au kg ou à la tonne) ou coûts relatifs ont été déterminés sur base du diagramme d'un article ([10]) repris à la FIGURE 3.4 suivante. Il est important de préciser que ces coûts relatifs entre nuances d'acier font référence à des coûts de matières pour des plats laminés. Etant donné que les profilés en acier HSS n'existent pas actuellement, cela constitue un bon ordre de grandeur de référence pour les comparaisons réalisées dans cette étude.

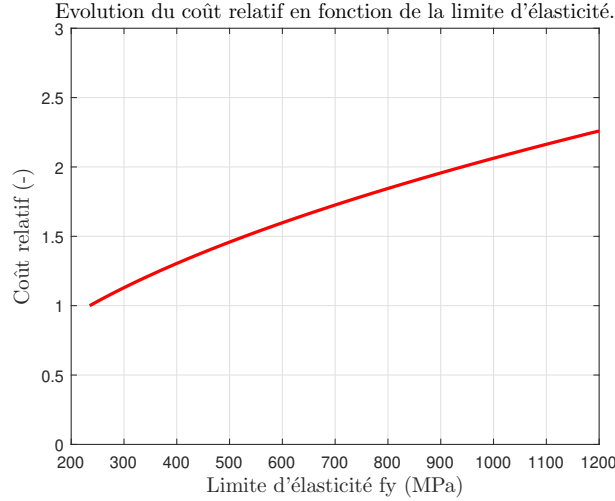


FIGURE 3.4 – Coût relatif de la nuance HSS par rapport à la nuance S235.

Sur base de cette FIGURE 3.4, il est donc possible de déterminer le coût relatif des différentes nuances HSS de la façon suivante :

$$\frac{c_{HSS}}{c_{S355}} = \frac{c_{HSS}}{c_{S235}} \cdot \frac{1}{\frac{c_{S355}}{c_{S235}}}$$

L'article précisant l'équation de la courbe la FIGURE 3.4, à savoir :

$$\frac{c_{HSS}}{c_{S235}} \approx \sqrt{\frac{f_y}{235}}$$

On a finalement la relation suivante :

$$\frac{c_{HSS}}{c_{S355}} = \sqrt{\frac{f_{y,HSS}}{235}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{355}{235}}} = \sqrt{\frac{f_{y,HSS}}{355}} \quad (3.3)$$

Les coûts relatifs pour les différentes nuances HSS considérées sont repris à la TABLE 3.1 suivante.

Coût relatif considéré	valeur associée
$\frac{c_{S500}}{c_{S355}}$	1.187
$\frac{c_{S550}}{c_{S355}}$	1.245
$\frac{c_{S620}}{c_{S355}}$	1.321
$\frac{c_{S690}}{c_{S355}}$	1.394

TABLE 3.1 – Valeurs des coûts relatifs pour les nuances HSS considérées dans ce travail.

Bien que les valeurs de coûts relatifs d'une nuance HSS par rapport à la nuance RS soient évolutives dans le temps, ces valeurs seront prises comme valeurs références au travers de ce rapport.

Cependant, une étude de la sensibilité du coût relatif sur les résultats sera réalisée dans un chapitre ultérieur.

Chapitre 4

Etude Locale

4.1 Eléments tendus

Dans un premier temps, l'intérêt des aciers HSS pour des éléments tendus va être étudié. Ce type d'éléments va être considéré en premier lieu puisqu'il constitue le type d'élément structural le plus simple et le plus performant. En effet, toutes les fibres longitudinales sont soumises à une même contrainte qui n'est limitée que par la résistance du matériau¹. Puisqu'il n'y a pas d'instabilités en traction et qu'il n'y a pas de critères de service considérés (ELS), le design d'un élément tendu est uniquement gouverné par sa résistance en section. Or, cette résistance en section de l'élément étant dépendante de la nuance utilisée, il y a de fortes chances de trouver de larges domaines d'intérêt des aciers HSS dans ce cas d'étude.

Il est à préciser qu'un élément tendu est nécessairement mis en charge par l'intermédiaire d'assemblages boulonnés ou non à ses extrémités. Ils constituent les sections critiques dues aux concentrations de contraintes (provenant d'une réduction de la section résistante et de ce fait d'un accroissement des contraintes aux bords des trous d'assemblage). Cependant, cela ne va impacter que très peu l'intérêt des aciers HSS. Une aire réduite devra juste être considérée à la place d'une aire brute. C'est pour cette raison que cela va être négligé au travers de cette section.

De plus, les éléments tendus fréquemment rencontrés dans la construction métallique sont les suivants :

- Les sections tubulaires à section carrée ou circulaire.
- Les sections simples telles que les cornières
- Les sections pleines telles que les plats
- Les sections laminées telles que les profilés H ou I.
- Les câbles

Au travers de cette section, seules les sections laminées en I ou H vont être étudiées par souci de cohérence avec le reste du travail.

1. Les informations générales de ce type sont issues du cours d'éléments métalliques du professeur J-P Jaspart à l'Université de Liège ([9])

4.1.1 Simulations numériques

L'étude de l'intérêt économique des aciers HSS va être réalisée à l'aide de simulations numériques dans le logiciel MATLAB.

Variables, données

Les différentes variables du code sont les suivantes :

- Les nuances d'acier HSS considérées à savoir S500, S550, S620 et S690.
- La longueur de l'élément $L \in [1\ 8]m$
- L'effort axial de traction appliqué sur la colonne $N_{ed} \in [300\ 3000]kN$
- Les coûts relatifs des différentes nuances d'acier HSS : $\frac{c_{S500}}{c_{S355}} = 1.187$, $\frac{c_{S550}}{c_{S355}} = 1.245$, $\frac{c_{S620}}{c_{S355}} = 1.321$ et $\frac{c_{S690}}{c_{S355}} = 1.394$ comme déterminé dans le chapitre relatif à la méthodologie du travail.
- La gamme de profilés laminés étudiée HEA, HEB, ...

Il est à noter que les conditions d'appuis n'ont aucune influence sur les résultats pour ce type de chargement.

Organigramme du code

L'organigramme du code implémenté dans MATLAB est repris à la FIGURE 4.1. Celui-ci suit la procédure classique établie dans le chapitre relatif à la méthodologie du travail.

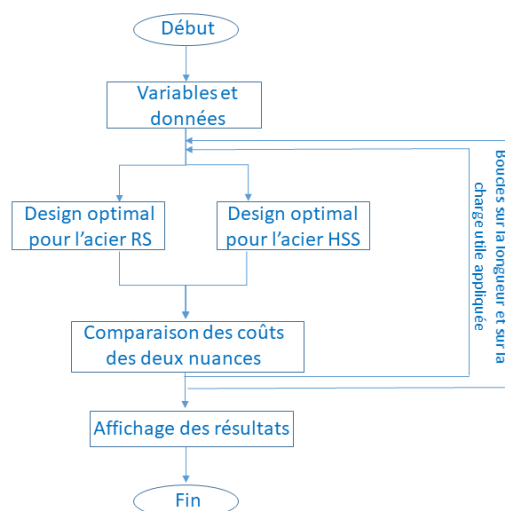


FIGURE 4.1 – Organigramme du code concernant les éléments en traction pure.

4.1.2 Résultats

Les résultats obtenus pour un profilé HEA en traction pure et pour une comparaison entre la nuance d'acier HSS S500 et la nuance RS S355 sont repris à la FIGURE 4.2.

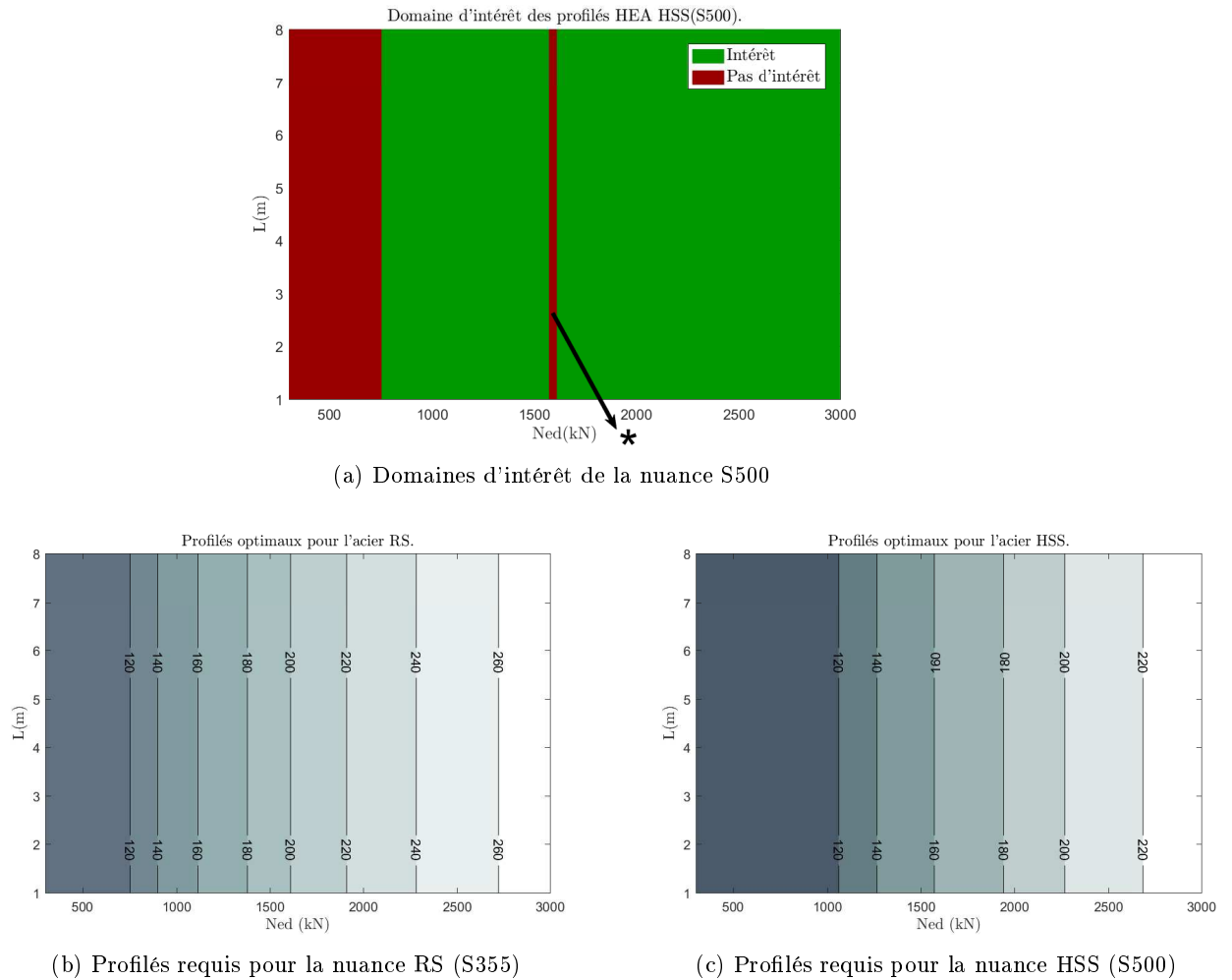


FIGURE 4.2 – Domaine d'intérêt et profils requis pour des profilés HEA tendus en acier S500.

Dans les faits, il n'y a pas d'intérêt économique de passer à une nuance HSS si le profilé requis pour la nuance RS est le même que celui de la nuance HSS. La FIGURE 4.2 montre qu'il n'y a pas d'intérêt tant que : $N_{ed} < N_{pl,rd,HEA100} = 752.6 kN$. En effet, si le profilé optimal requis est le même pour les deux nuances d'acier comparées, il n'y aura jamais d'intérêt économique puisque le coût relatif de la nuance HSS par rapport à la nuance RS sera toujours supérieur à l'unité.

Comme expliqué précédemment, les résultats sont indépendants de la longueur de l'élément puisqu'un élément tendu n'est pas sujet à instabilités. Toutefois, une ligne "sans intérêt" apparaît au milieu du domaine d'intérêt (zone * sur la FIGURE 4.2 (a)).

Afin de donner une explication à cette zone, les nombres de profils d'écart par zone entre les deux designs ont été représentés à la FIGURE 4.3.

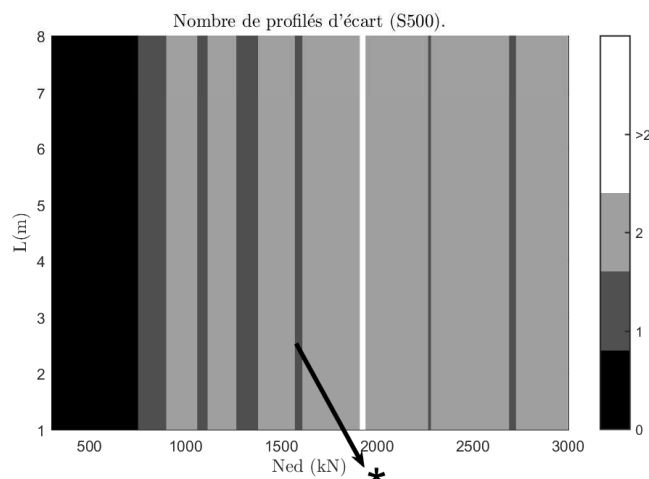


FIGURE 4.3 – Nombre de profils d'écart entre les deux designs.

La zone pour laquelle l'acier HSS n'a pas d'intérêt est une zone dans laquelle il n'y a qu'un profil d'écart entre les deux profils requis pour les deux designs (zone * sur la FIGURE 4.3). Selon la condition (3.2) établie dans le chapitre relatif à la méthodologie du travail, il n'y a pas d'intérêt dans cette zone si $\frac{G_{RS}}{G_{HSS}} < \frac{c_{S500}}{c_{S355}}$ (G =poids par m courant). Or, lorsque l'évolution du rapport de poids est tracée entre deux profils HEA successifs, on obtient le graphique repris à la FIGURE 4.4.

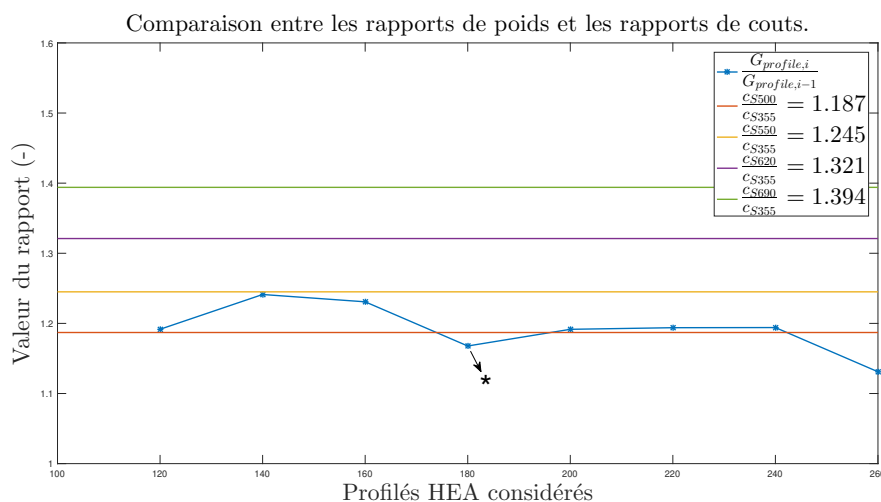


FIGURE 4.4 – Comparaison des rapports de poids de deux profils successifs avec les coûts relatifs des nuances HSS.

Les deux profils requis dans la zone * sont le profilé HEA180 pour la nuance RS et le profilé HEA160 pour la nuance HSS.

Or, au vu de la FIGURE 4.4, on remarque que le rapport de poids entre le profilé HEA180 et le profilé HEA160 est inférieur au coût relatif de la nuance S500, c'est ce qui explique que cette nuance HSS n'ait pas d'intérêt économique dans cette zone précise.

En conclusion, la zone où la charge axiale de calcul est inférieure à la résistance axiale plastique du premier profilé du catalogue en acier S355 ($N_{ed} < N_{pl,rd,S355,1er\ profilé}$) ne présentera

jamais d'intérêt. Et cela peu importe la nuance et la gamme de profils analysées puisque dans cette zone les deux designs requièrent le premier profilé de la gamme. Le rapport de poids (ou d'aires) entre les deux profilés requis vaut donc 1 et ce sera toujours inférieur au coût relatif puisque la nuance HSS est plus chère que la nuance RS. Ensuite, pour le reste du domaine, l'intérêt économique ou non de l'utilisation de l'acier HSS dépendra exclusivement de la condition (3.2).

La manière d'interpréter le diagramme de résultats pour la nuance HSS S500 et les profilés HEA étant désormais comprise, une comparaison couvrant les autres nuances ainsi que les différentes gammes de profilés peut être réalisée. Cela permettra de confirmer ou de compléter les premières conclusions tirées ci-dessus.

4.1.3 Comparaisons

Comparaison des nuances HSS

Une comparaison des résultats pour différentes nuances HSS va être réalisée afin d'étudier l'influence de la nuance HSS considérée sur les résultats observés à la section précédente. Les résultats pour les diverses nuances HSS considérées sont repris à la FIGURE 4.5.

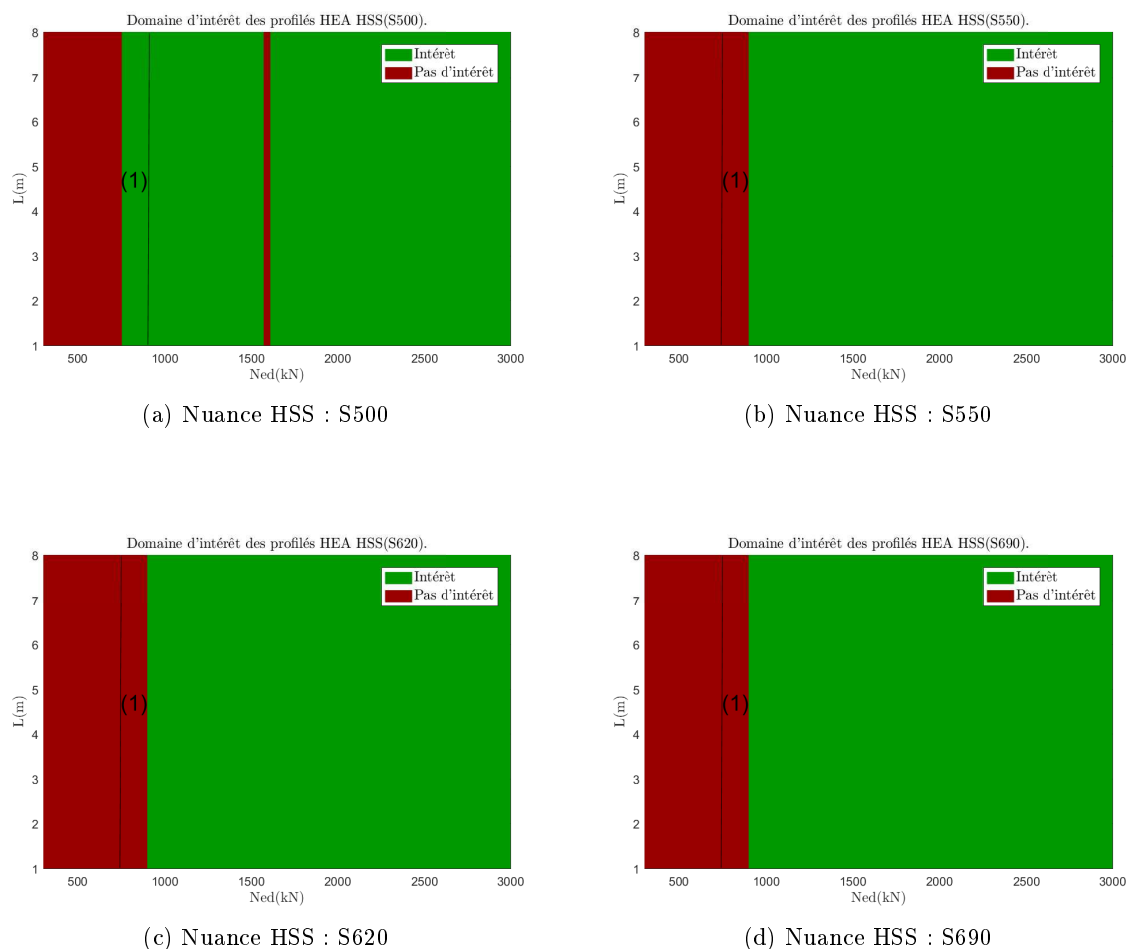


FIGURE 4.5 – Influence du choix de la nuance HSS sur l'intérêt pour un élément HEA tendu.

La comparaison des résultats pour les différentes nuances HSS montre que les domaines de non-intérêt des profils HSS vont au delà de la résistance plastique du premier profilé (en acier RS) pour les nuances S550, S620 et S690. En effet, la zone (1) sur la FIGURE 4.5 montre un intérêt économique de la nuance S500 mais pas d'intérêt économique pour les autres nuances HSS. Cela peut à nouveau s'expliquer en représentant le nombre de profils d'écart pour les différentes nuances HSS.

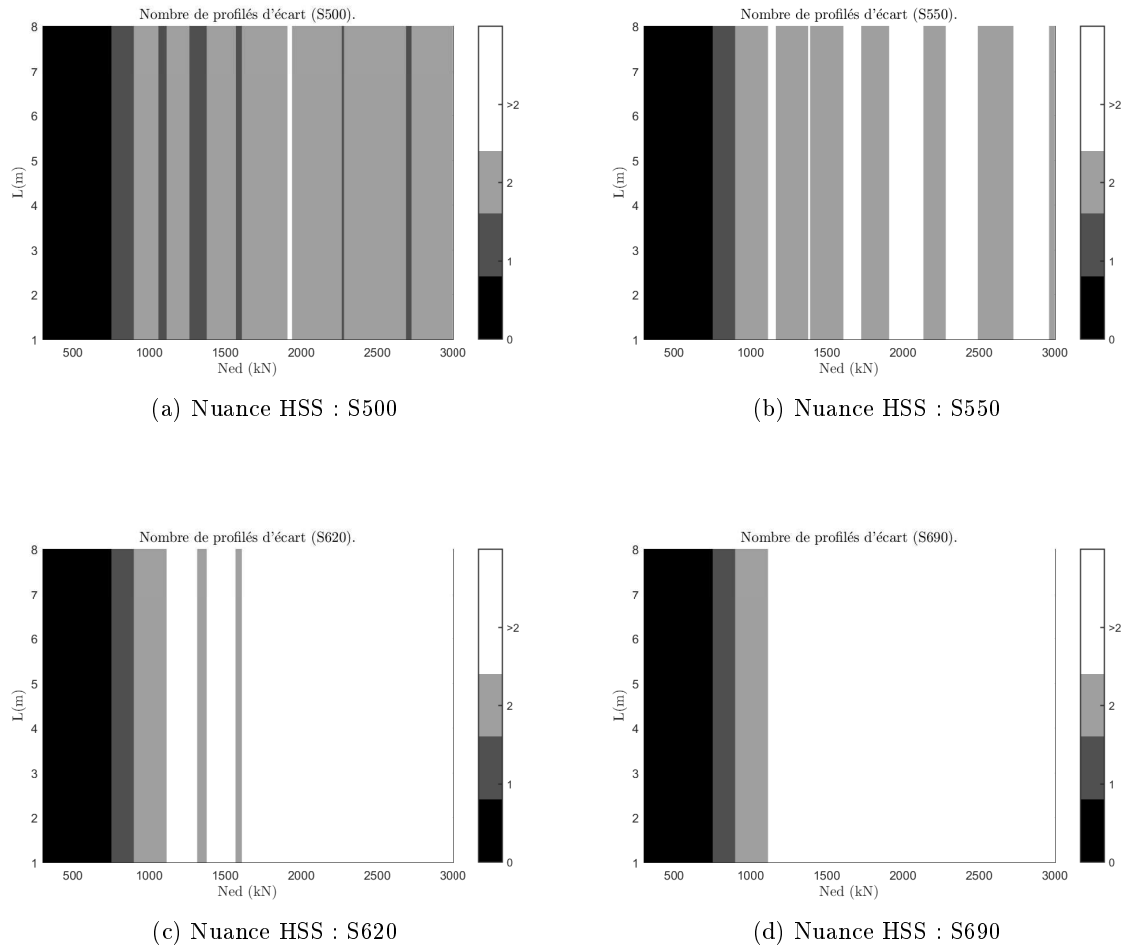


FIGURE 4.6 – Nombre de profils d'écart entre le design pour la nuance RS et celui pour la nuance HSS.

Au vu de la FIGURE 4.6, la zone (1) de la FIGURE 4.5 correspond à la seule zone possédant un seul profilé d'écart pour les nuances S550, S620 et S690. Le fait qu'il n'y ait pas d'intérêt économique s'explique par la FIGURE 4.4. En effet dans cette zone (1), les profils requis sont le HEA120 pour la nuance RS et le HEA100 pour la nuance HSS. Or, le rapport de poids entre ces deux profils est supérieur au coût relatif de la nuance S500 mais inférieur aux coûts relatifs des autres nuances HSS. C'est ce qui explique que cette zone n'ait pas d'intérêt économique pour les nuances S550, S620 et S690 mais bien pour la nuance S500 selon la condition (3.2).

Comparaison des différents types de profilés

Une deuxième comparaison consiste à analyser l'influence de la gamme de profilés choisie sur les résultats. Les résultats pour les profilés HEA, HEB, HEC, HEM et HD pour la nuance HSS S500 sont repris à la FIGURE 4.7 suivante.

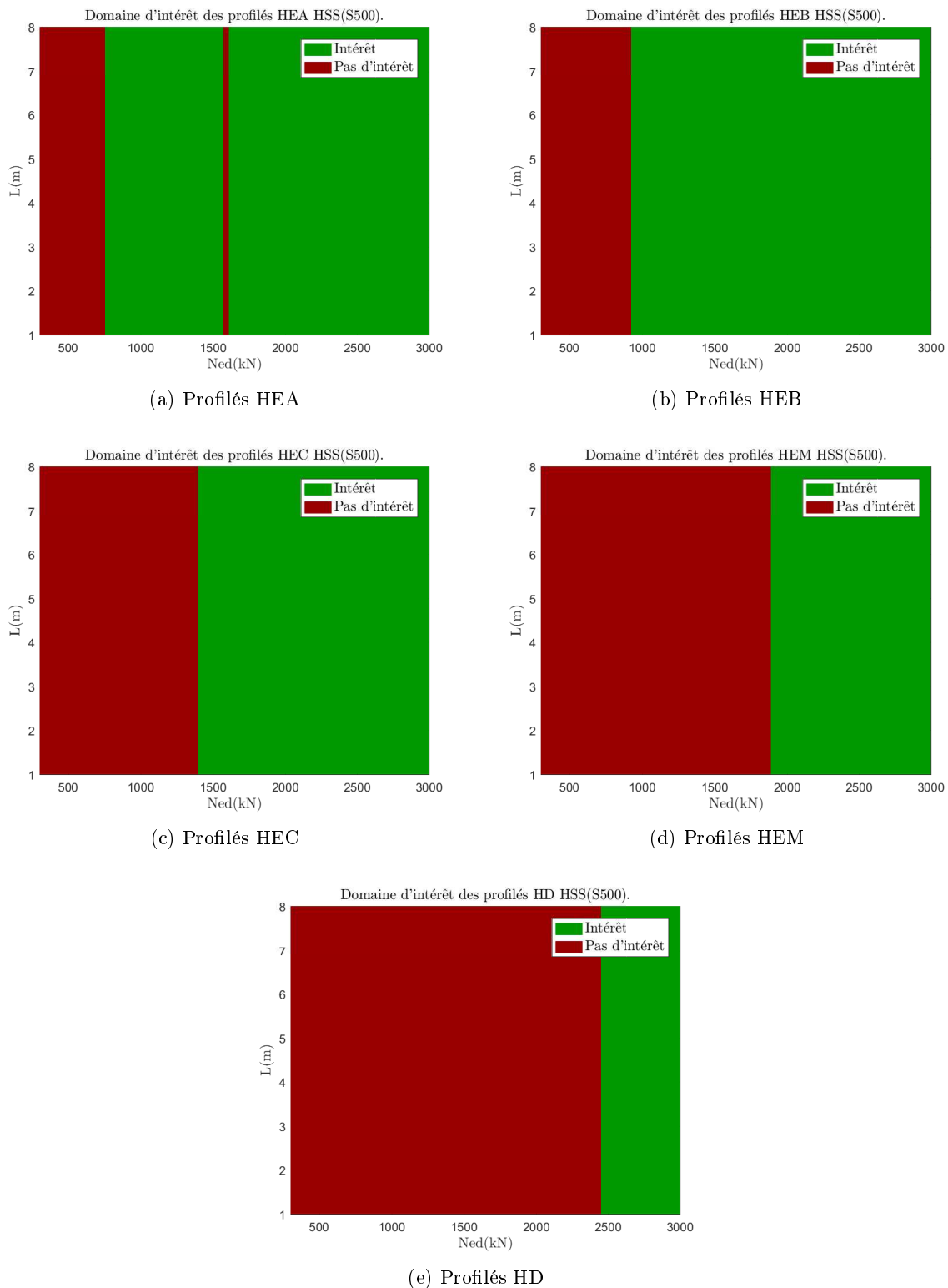


FIGURE 4.7 – Influence du choix de la gamme de profilés sur l'intérêt pour un élément tendu.

Au vu des résultats, on peut remarquer que le fait de changer de gamme de profilés a pour effet de réduire l'intérêt de la nuance HSS. Cela s'explique par le fait que la résistance axiale plastique du premier profilé RS est plus élevée pour les profilés HEB, HEC, HEM et HD que pour les profilés HEA. La TABLE 4.1 reprend l'ensemble des résistances axiales des premiers profilés en acier RS.

Type de profilés	Résistance plastique (kN)
HEA100	752,6
HEB100	923,0
HEC100	1395,15
HEM100	1888,6
HD260x54.1	2449.5

TABLE 4.1 – Résistance plastique des premiers profilés (en acier RS) des différentes gammes.

Une des conclusions établie précédemment est que tant que la charge appliquée est inférieure à la résistance axiale du premier profilé pour la nuance RS, les deux designs requièrent le premier profilé de la gamme considérée et il n'y a donc pas d'intérêt d'utiliser une nuance HSS plutôt que la nuance RS.

La conclusion générale de cette comparaison est donc que plus l'aire du premier profilé est importante, autrement dit plus la massivité de la gamme de profilés est importante, plus l'intérêt économique de la nuance HSS est restreint dans le domaine qui a été considéré. Ce sont donc les profilés possédant les plus petites sections qui sont susceptibles de présenter les zones d'intérêt les plus importantes. Ces résultats sont à relativiser car, comme cela a été mentionné dans le chapitre relatif à la méthodologie, les gammes de profilés telles que les HEM ou les HD ont des massivités si importantes qu'elles sont capables de supporter des charges bien supérieures à celles que le domaine considère. En effet, leur massivité est telle que leur utilisation n'est pas privilégiée pour ce type de charges, il n'est pas impossible que ces profilés en acier HSS aient un intérêt considérable pour des charges bien plus importantes. Si l'intervalle de charges n'est plus [300 3000] kN mais [2000 6000] kN, la FIGURE 4.8 suivante confirme donc l'intérêt de la gamme de profilés HD pour des charges plus importantes.

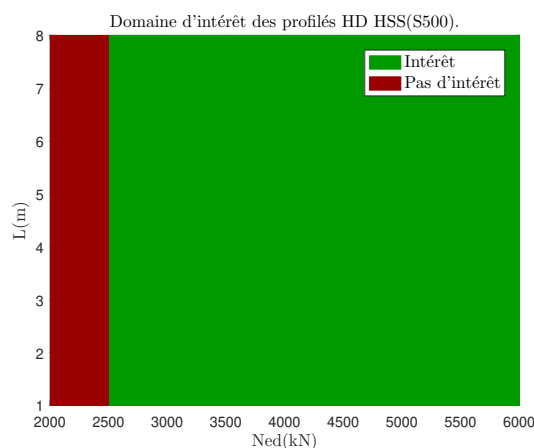


FIGURE 4.8 – Intérêt de la nuance HSS S500 pour la gamme de profilés HD en traction pure.

Cela confirme qu'il faut donc savoir prendre du recul par rapport aux résultats obtenus lorsqu'on compare différentes gammes de profilés entre elles.

4.1.4 Méthodes pour déterminer l'intérêt économique de la nuance HSS

Afin de justifier l'intérêt économique de l'utilisation d'une nuance HSS par rapport à l'utilisation d'une nuance RS pour un élément en traction pure, deux méthodes distinctes ont été élaborées au cours de ce travail de fin d'étude.

Méthode 1 : méthode déterminant directement les profilés requis

L'objectif de cette première méthode est de fournir à l'utilisateur des aides afin de déterminer graphiquement ou numériquement les résultats des deux designs pour les deux nuances comparées. Au vu de ces résultats, l'utilisateur pourra ensuite déterminer très rapidement si il y a un intérêt ou non grâce à la condition (3.2).

Pour ce faire, il convient d'énoncer le critère permettant d'établir la limite d'utilisation des profilés. Un profilé peut être utilisé tant que la charge axiale de calcul est inférieure à sa résistance axiale, c'est-à-dire que :

$$N_{ed} < N_{pl,rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.1)$$

où A est l'aire du profilé, f_y la limite d'élasticité et γ_{M0} le coefficient partiel de sécurité pris égal à 1,0. Une routine a été implémentée afin d'exécuter cette méthode.

Un exemple va être illustré afin de montrer la marche à suivre.

Premièrement la routine pose à l'utilisateur les questions suivantes :

```
Quelle est la longueur de l'élément tendu (en m)?7
Que vaut la charge de traction appliquée sur l'élément (en kN)?2000
Pour quelle nuance d'acier haute performance voulez-vous étudier l'intérêt? S500
Quelle gamme de profilés voulez-vous étudier?
1: HEA
2: HEB
3: HEC
4: HEM
5: Tous
1|
```

FIGURE 4.9 – Questions posées par la routine MATLAB à l'utilisateur.

Ensuite, la routine fournit à l'utilisateur les graphiques repris à la FIGURE 4.10 ainsi que les réponses suivantes.

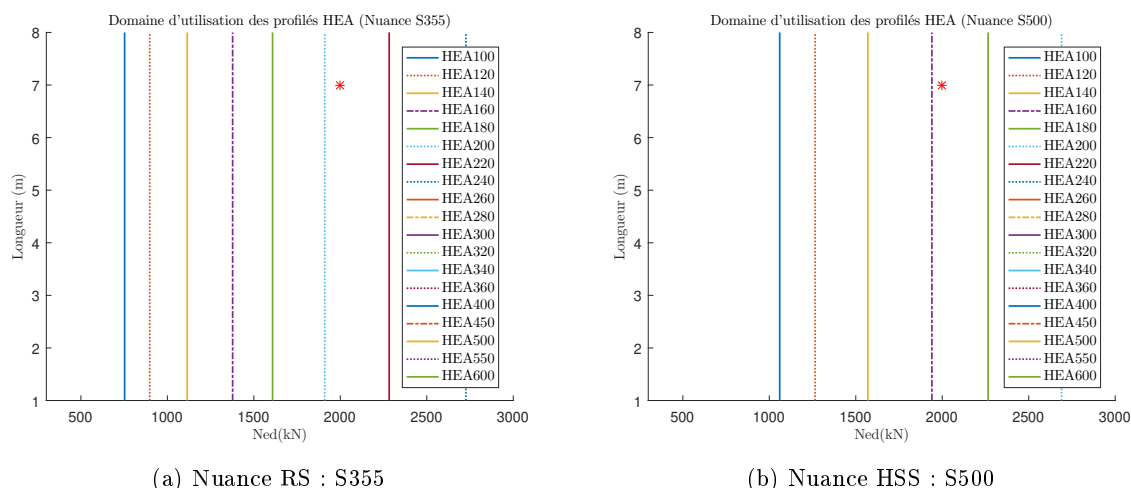


FIGURE 4.10 – Graphiques fournis par la routine.

Il est utile de préciser que la routine permet de sortir ces graphiques pour les différentes nuances HSS. Cela constitue les outils pour la méthode dite "graphique". En effet, sur base de ces représentations, le concepteur peut connaître quels sont les profils optimaux requis pour les deux nuances comparées graphiquement.

```

Le profilé requis avec du S355 est: HEA220
Le profilé requis avec du S500 est: HEA180
Quel est le coût relatif de la nuance HSS par rapport à la nuance S355?1.187
Le rapport de poids des deux profilés requis vaut: 1.4194 il y a donc un intérêt !
>> |

```

FIGURE 4.11 – Réponses fournies par la routine MATLAB à l'utilisateur.

La routine fournit donc en quelques secondes à la fois les profils requis pour les deux designs ainsi qu'une réponse quant à l'intérêt économique ou non de passer à une nuance HSS pour une charge de traction et une longueur d'élément données.

Méthode 2 : méthode donnant directement le rapport de poids entre les deux designs

Cette deuxième méthode, quant-à-elle, vise à déterminer l'intérêt économique directement sur base d'une seule figure et non de deux comme précédemment. En effet, comme nous avons pu le remarquer au travers de l'analyse des résultats, la condition (3.2) explique l'entièreté des résultats obtenus. La deuxième méthode consisterait donc à représenter le rapport de poids entre les deux profilés requis pour les deux designs. L'utilisateur pourra donc, sur base de cette représentation, savoir directement quel est le rapport de poids entre les deux profilés optimaux des deux nuances comparées et ainsi comparer ce rapport avec son coût relatif de sa nuance HSS pour justifier d'un intérêt économique ou non de cette nuance d'acier pour son design.

La représentation du rapport de poids pour l'acier HSS S500 et pour la gamme de profils HEA est reprise à la FIGURE 4.12.

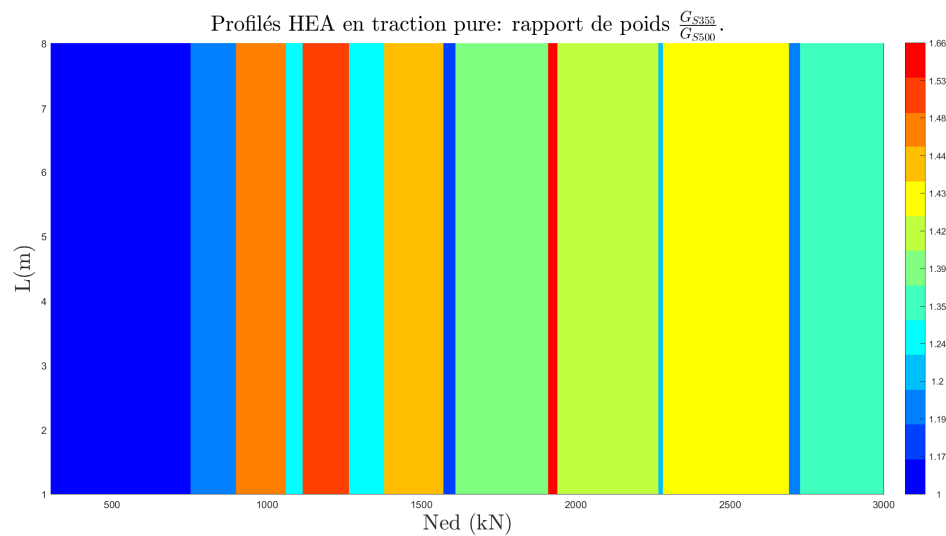


FIGURE 4.12 – Rapport de poids entre les deux profils requis pour la nuance HSS S500 et pour la gamme de profils HEA.

Le seul inconvénient qui pourrait être trouvé à cette deuxième méthode est que l'utilisateur ne connaîtra pas les profils requis. En effet, cette méthode permet de déterminer très vite si il y a un intérêt ou non mais ne donne pas les résultats des deux designs. Le concepteur devra donc calculer quel est le profilé optimal pour la nuance présentant un intérêt économique.

Il est à noter que les diagrammes de rapports de poids analogues à celui de la FIGURE 4.12 pour d'autres gammes de profilés et d'autres nuances HSS sont repris à l'Annexe A. Les gammes ont été considérées indépendamment les unes des autres pour les raisons évoquées dans le chapitre relatif à la méthodologie.

4.2 Eléments comprimés

Cette deuxième section de l'étude locale se focalise sur l'étude de l'intérêt économique des aciers à haute limite d'élasticité pour des éléments en compression seule.

Ce type d'élément en compression pure est plutôt rare dans le domaine de la construction métallique puisque si la charge est quelque peu excentrée cela induit un moment et donc de la flexion dans l'élément. Cependant, on dimensionnera l'élément en compression seule lorsque la flexion est relativement faible vis-à-vis de la compression. Dans ce cas, l'élément sera communément désigné sous le nom de colonnes.

Deux types d'éléments en compression seule seront distingués à savoir² :

- Les éléments courts ou trapus : ce type d'élément est défini comme tel si sa résistance est gouvernée par la résistance de sa section transversale.
- Les éléments élancés : ce type d'élément est défini comme tel si sa résistance est gouvernée par les instabilités (flambement par flexion). En effet, le flambement de la colonne empêche celle-ci d'atteindre sa résistance plastique.

Au travers de cette section, les résultats prenant en compte ou non les instabilités seront investigués.

La résistance d'un élément est calculée sur base de l'Eurocode 3 [1] selon la formule suivante :

$$N_{ed} < N_{b,rd} = \frac{\chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.2)$$

où ;

- χ est le coefficient de pénalisation de la résistance en section permettant de prendre en considération le flambement. Ce coefficient est dépendant de l'élancement de l'élément et vaut donc 1 pour un élément trapu.
- β_A est le coefficient de pénalisation de la résistance en section permettant de prendre en considération le voilement de la section. Ce coefficient vaut 1 pour les sections de classe 1, 2 et 3 mais vaut $\frac{A_{eff}}{A}$ pour les sections de classe 4.
- γ_{M1} est le coefficient partiel de sécurité, généralement pris égal à 1.
- Les courbes européennes de flambement considérées sont celles de la nouvelle version de l'Eurocode 3 partie 1-1 [12] puisque les courbes de flambement y sont définies pour des nuances d'acier jusqu'à S700.

Au vu de la relation (4.2), on remarque que la résistance de la section est dépendante de la nuance d'acier utilisée que ce soit pour un élément trapu ($\chi = 1$) ou d'un élément élancé ($\chi < 1$). Cela

2. Les informations générales de ce type sont issues du cours d'éléments métalliques du professeur J-P Jaspart à l'Université de Liège ([9])

laisse présager d'éventuels domaines d'intérêt des aciers HSS.

Dans un premier temps, une étude de l'intérêt économique d'un acier S500 (HSS) par rapport à un acier S355 (RS) pour une colonne HEA bi-appuyée sera réalisée. Ensuite, l'étude des différents paramètres du code sera réalisée.

4.2.1 Simulations numériques

Afin d'étudier l'intérêt des aciers HSS pour des éléments en compression pure, des simulations numériques vont être réalisées à l'aide du logiciel MATLAB.

Variables, données

Les différentes variables du code sont les suivantes :

- Les nuances d'aciers HSS considérées à savoir S500, S550, S620 et S690.
- La longueur de la colonne $L \in [1\ 8]m$
- La charge axiale appliquée sur la colonne en son sommet $N_{ed} \in [300\ 3000]kN$
- Le coût relatif des différentes nuances d'acier : $\frac{c_{S500}}{c_{S355}} = 1.187$, $\frac{c_{S550}}{c_{S355}} = 1.245$, $\frac{c_{S620}}{c_{S355}} = 1.321$ et $\frac{c_{S690}}{c_{S355}} = 1.394$.
- Flambement selon l'axe fort ou selon l'axe faible
- La gamme de profils laminés étudiée HEA, HEB, ...

Organigramme du code

L'organigramme du code est repris à la FIGURE 4.13 suivante.

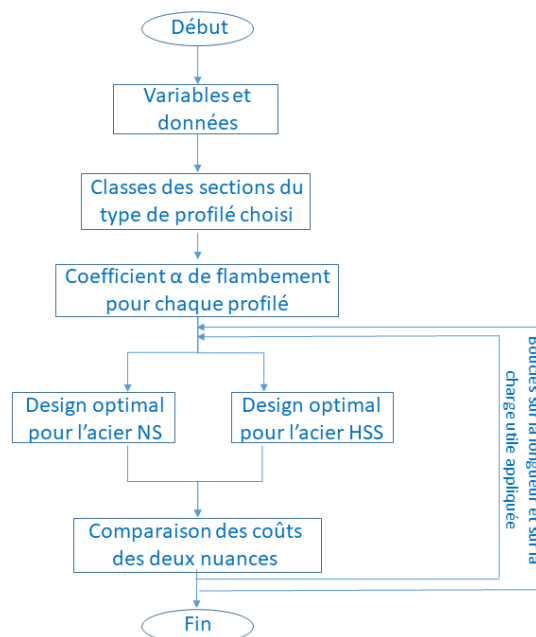


FIGURE 4.13 – Organigramme du code pour des éléments en compression pure.

Les designs sont des processus itératifs évoluant dans le catalogue de profils afin de déterminer le profilé optimal pour la longueur de la colonne et pour la charge axiale considérée.

Il est à noter qu'à chaque itération le poids propre du profilé courant est pris en compte de telle sorte que la charge N_{ed} représente la charge utile de calcul (déjà pondérée par les coefficients de sécurité) appliquée sur la colonne.

Deux fonctions ont été implémentées dans MATLAB, une déterminant les classes des profils laminés considérés pour les deux nuances d'acier comparées et l'autre calculant le coefficient α de flambement selon les courbes européennes de flambement définies dans la nouvelle version de la partie 1-1 de l'Eurocode 3 [12] (norme prenant en compte les nuances d'acier jusqu'à S700).

4.2.2 Résultats

Résultats sans prise en compte du flambement

Les graphiques des domaines d'intérêt ainsi que des profils requis pour une colonne bi-appuyée de type HEA empêchée de flamber et comparant les nuances S355 (RS) et S500 (HSS) sont repris à la FIGURE 4.14 suivante.

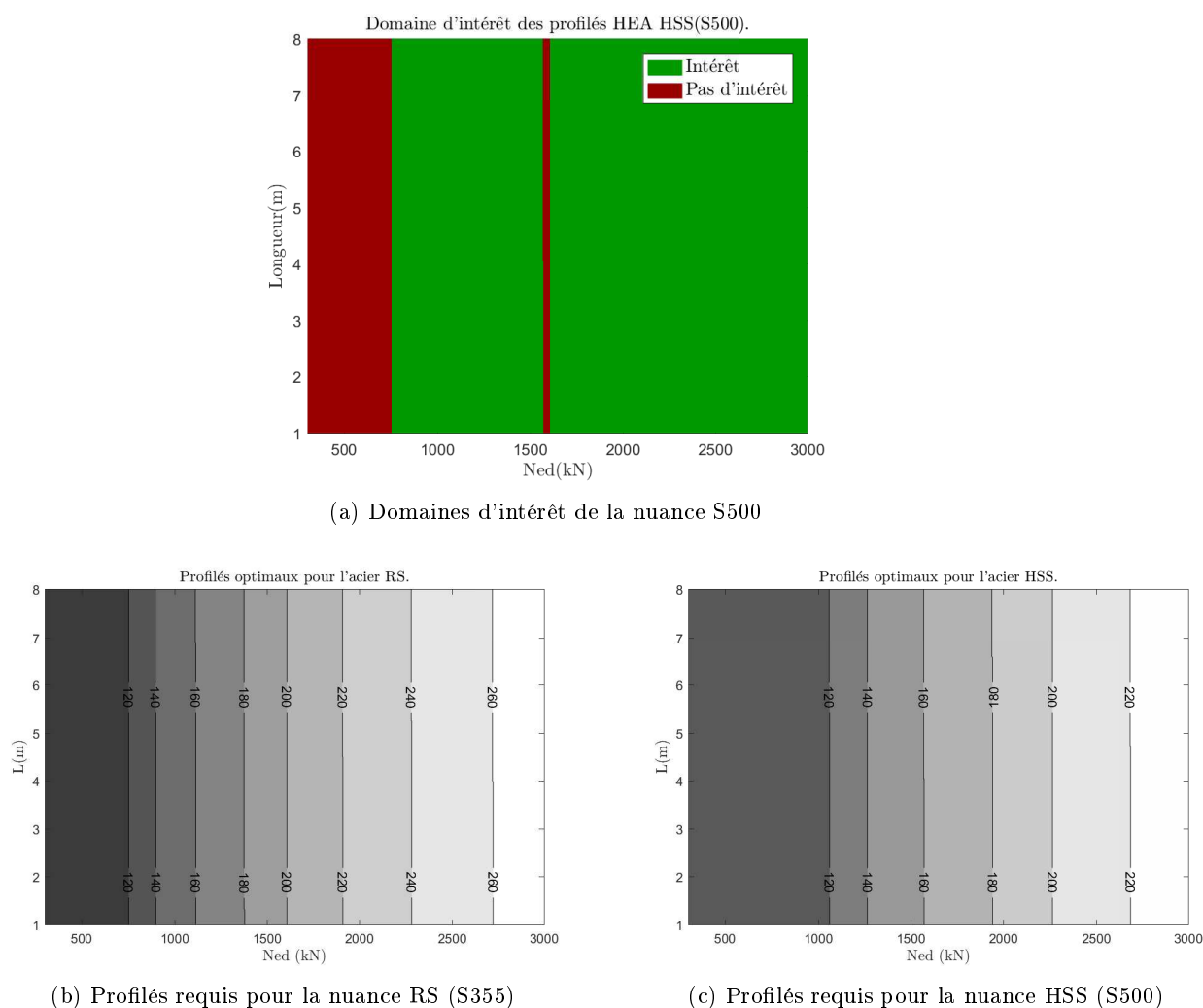


FIGURE 4.14 – Domaine d'intérêt et profils requis pour des aciers S500 et des profils HEA en compression pure (sans flambement).

Au vu des résultats obtenus, les conclusions sont semblables à celles obtenues pour les éléments tendus. Cela s'explique par le fait que la résistance en section d'un élément soumis à un effort axial pur est la même pour autant que les instabilités soient négligées (résistance en section gouvernant le dimensionnement).

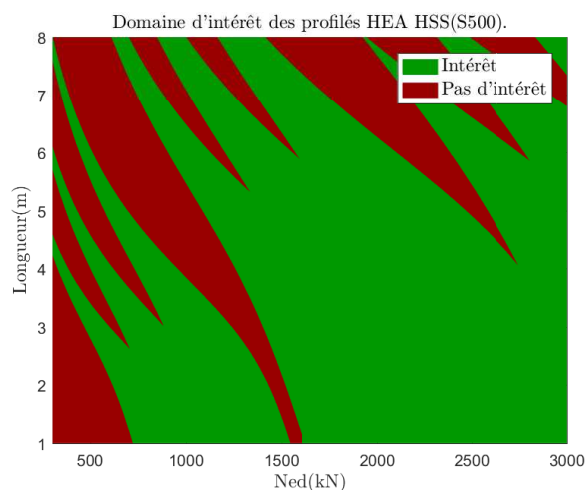
A la différence des résultats obtenus en traction pure, le poids propre a été pris en compte puisque ce dernier augmente les contraintes normales dans l'élément. C'est cela qui est à l'origine des quelques décalages pouvant apparaître lorsque des zooms sont réalisés sur la FIGURE 4.14.

Cependant, obtenir des résultats indépendants de la longueur de la colonne a peu de sens en compression puisque plus la colonne est élancée plus celle-ci risque de périr par instabilités (flambement par flexion). Cette étude fait l'objet de la section suivante.

Résultats avec flambement

Le code a été implémenté en suivant la procédure de design d'un élément en compression seule de l'Eurocode 3 [1]. Les courbes européennes de flambement considérées proviennent de la nouvelle version de l'Eurocode 3 partie 1-1 [12] puisque cette norme considère les nuances d'acier jusqu'à S700 comme mentionné précédemment.

Par rapport au cas sans flambement, il convient d'intégrer un coefficient de pénalisation χ afin de prendre en compte les instabilités (flambement par flexion) dans la formule de résistance d'un élément comprimé.



(a) Domaines d'intérêt de la nuance S500

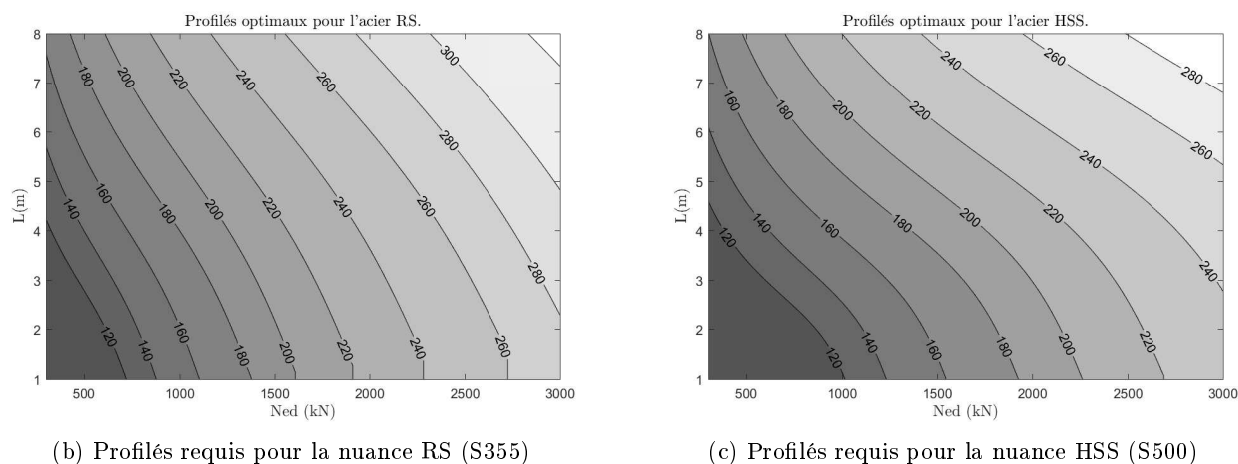


FIGURE 4.15 – Domaine d'intérêt et profils requis pour des aciers S500 et des profils HEA en compression pure (flambement selon l'axe fort).

Au vu de la FIGURE 4.15, le comportement des résultats est désormais influencé par la longueur de la colonne, ce qui est logique puisque désormais les instabilités sont prises en compte. Cependant, une constatation semblable à celle faite précédemment pour les éléments tendus est qu'il n'y a pas d'intérêt de passer à du S500 tant que l'on se situe sous la limite d'utilisation du premier profilé en acier RS. Ensuite, pour le reste du domaine, les décalages entre les courbes européennes de flambement pour l'acier RS et l'acier HSS sont à l'origine des zones d'intérêt économique constatées. Ces décalages sont représentés sur la FIGURE 4.16 pour un profilé HEA100.

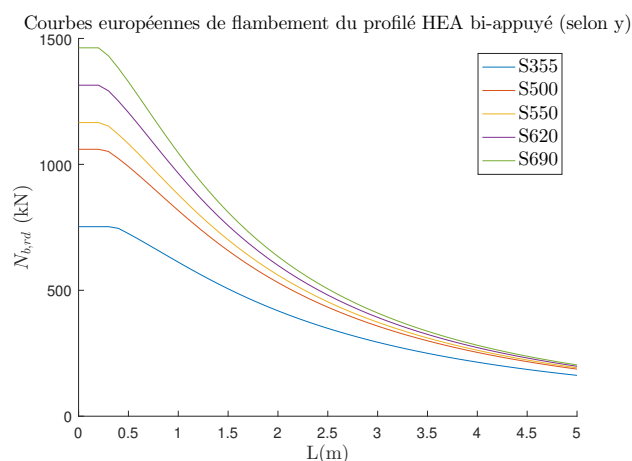


FIGURE 4.16 – Décalages entre les courbes européennes de flambement pour un profilé HEA100 en acier S355, S500, S550, S620 et S690.

Cette FIGURE 4.16 illustre le fait que plus l'élancement est important, plus la résistance axiale de l'élément devient identique peu importe la nuance d'acier considérée. Ce qui confirme que la prise en compte des instabilités telles que le flambement par flexion est néfaste pour l'intérêt des aciers HSS car plus l'élément est élancé moins il y a d'intérêt d'utiliser la nuance HSS. Ceci est à l'origine des franges d'intérêt pouvant être observées sur les résultats. De façon analogue aux éléments en traction pure, une analyse du nombre de profils d'écart entre les deux

designs des deux nuances comparées va être réalisée dans la section suivante afin d'expliquer les résultats de façon détaillée.

Dans la suite de cette section, un critère sera établi afin de pouvoir tracer les limites d'utilisation des différents profilés pour les deux nuances d'acier considérées. En effet, comme explicité précédemment, c'est ce décalage entre les limites d'utilisations des profilés pour les deux nuances qui est à l'origine des zones d'intérêt.

4.2.3 Comparaisons

Dans les sections précédentes, seuls les profilés HEA bi-appuyés avec un flambement selon leur axe fort ont été considérés. En ce qui concerne l'évaluation de l'intérêt économique des aciers HSS, seule la nuance d'acier S500 a été considérée jusqu'à présent. L'objet de cette section est d'étudier l'influence de la variation de ces paramètres et d'analyser les résultats obtenus.

Comparaison des nuances HSS

Dans cette première comparaison, l'influence du choix de la nuance HSS va être analysée en considérant l'ensemble des rapports de coûts repris à la section 4.2.1. La FIGURE 4.17 représente l'ensemble des résultats obtenus pour des profilés HEA bi-appuyés (flambement selon l'axe fort).

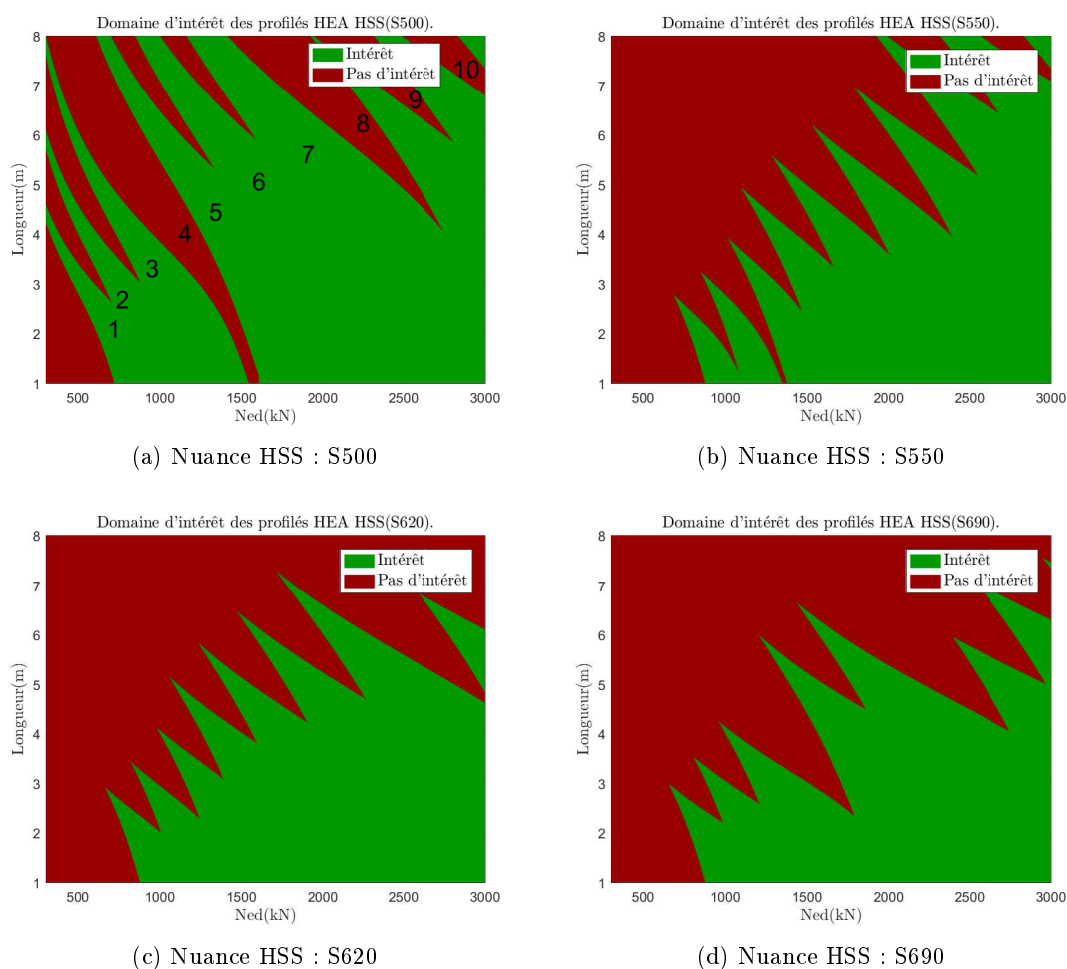


FIGURE 4.17 – Influence du choix de la nuance HSS sur l'intérêt de leur utilisation.

Il est aisé de remarquer que, comme attendu, plus la longueur est importante plus le domaine d'intérêt économique des aciers HSS est restreint pour les raisons explicitées précédemment. Afin d'expliquer les différents résultats obtenus pour les différentes nuances, le nombre de profils d'écart entre le design avec un acier RS et un acier HSS a été investigué. Les résultats sont repris à la FIGURE 4.18.

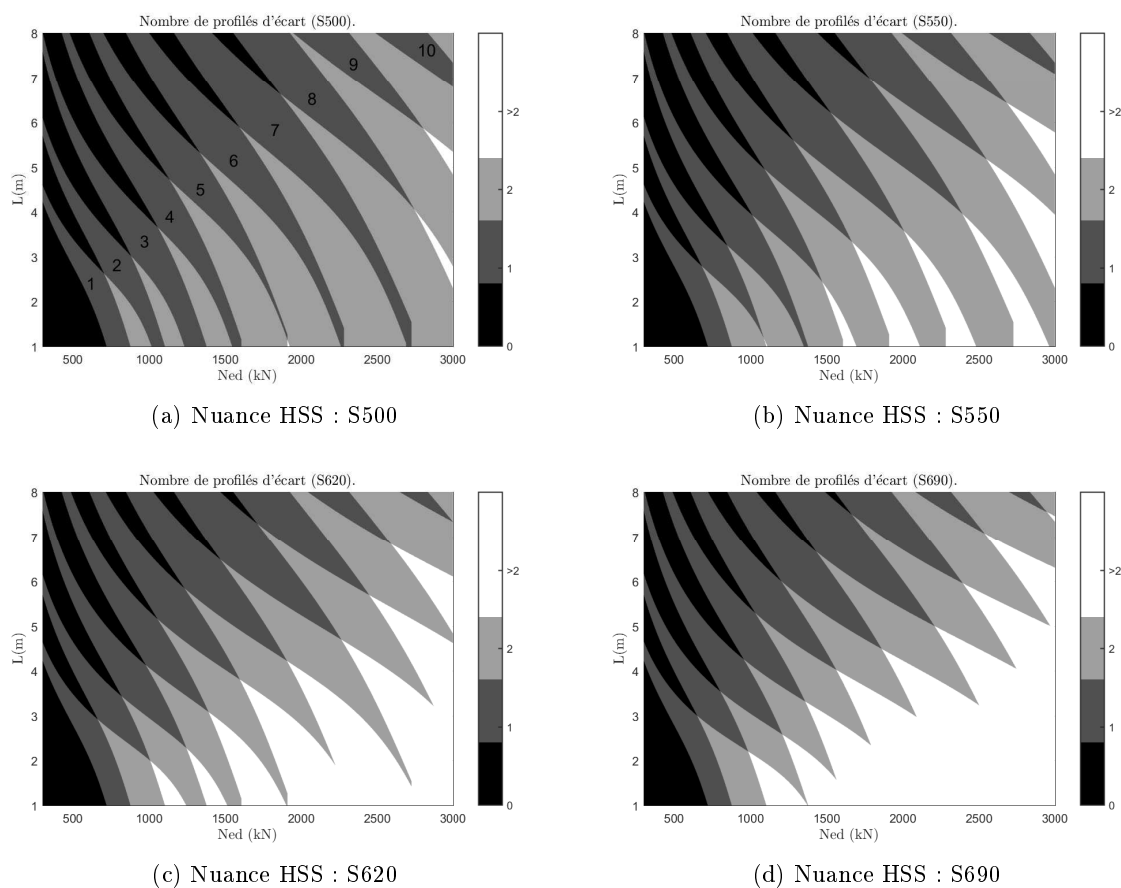


FIGURE 4.18 – Nombre de profils d'écart entre les deux profils requis pour les deux designs.

En comparant les FIGURES 4.17 et 4.18, une conclusion à établir est que plus on augmente la limite d'élasticité, plus les domaines présentant un seul profilé d'écart n'ont plus d'intérêt économique. Ceci s'explique par la relation (3.2). En effet, plus la nuance HSS est élevée plus le coût relatif des nuances HSS est élevé et donc moins il y a d'intérêt économique pour les zones à un seul profilé d'écart. Ceci est traduit graphiquement à la FIGURE 4.19.

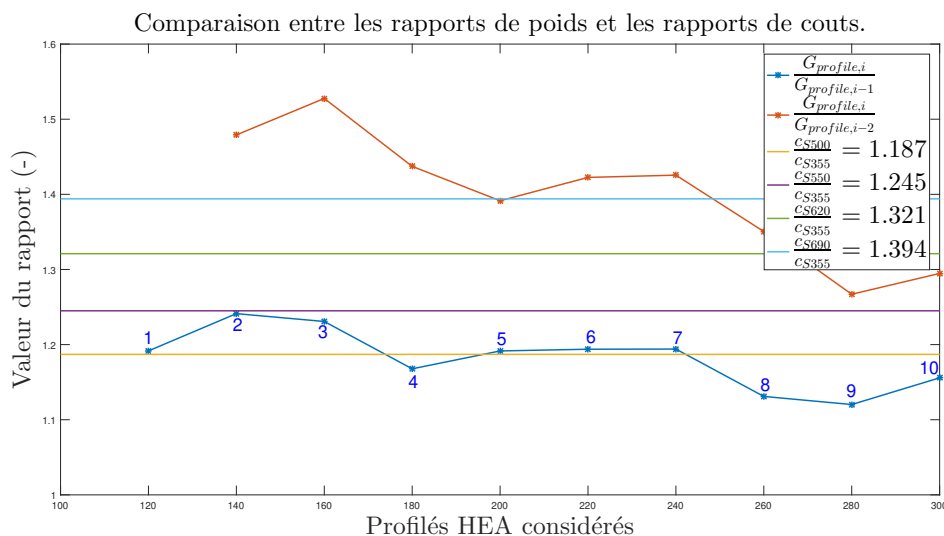


FIGURE 4.19 – Comparaison des rapports de poids des profils HEA successifs et des coûts relatifs.

Par exemple, pour la nuance S500, les dix franges à un profilé d'écart de la FIGURE 4.18 (a) entre les deux designs pour les deux nuances comparées sont également numérotées sur la FIGURE 4.17 (a). Seules la quatrième et les trois dernières ne présentent pas d'intérêt économique, cela peut s'expliquer par la FIGURE 4.19. En effet, sur la FIGURE 4.19, seuls le quatrième et les trois derniers rapports de poids entre deux profils successifs (courbe bleue) sont inférieurs au coût relatif de la nuance S500 (courbe jaune). C'est pour cela que ces franges ne présentent pas d'intérêt économique selon la condition (3.2),

Pour ce qui est du coût relatif de la nuance HSS S550 (courbe mauve sur la FIGURE 4.19), tous les rapports de poids de deux profils successifs sont inférieurs. Tandis que l'ensemble des rapports de poids pour deux profils d'écart sont supérieurs. On remarque donc, selon la condition (3.2), que toutes les franges à un profilé d'écart entre les deux designs de la FIGURE 4.18 (b) sont rouges sur la FIGURE 4.17 (b) (la nuance S550 n'a pas d'intérêt). De façon analogue, toutes les franges à deux profils d'écart de la FIGURE 4.18 (b) sont vertes sur la FIGURE 4.17 (b) (la nuance S550 a un intérêt économique) .

En ce qui concerne le coût relatif de la nuance HSS S620 (courbe verte sur la FIGURE 4.19), tous les rapports de poids de deux profils successifs sont également inférieurs. Cela se traduit par le fait que toutes les franges à un profilé d'écart de la FIGURE 4.18 (c) soient rouges sur la FIGURE 4.17 (c) (la nuance S620 n'a pas d'intérêt). Tandis que seuls les trois derniers rapports de poids à deux profils d'écart sur la FIGURE 4.19) sont inférieurs au rapport de coût. A nouveau, cela explique les résultats obtenus puisque seules les trois dernières franges à deux profils d'écart sur la FIGURE 4.18 (c) sont rouges sur la FIGURE 4.17 (c).

La FIGURE 4.18 combinée à la FIGURE 4.19 permet donc d'expliquer l'entièreté des résultats obtenus à la FIGURE 4.17.

La conclusion de cette comparaison est que plus la limite d'élasticité de la nuance HSS est élevée, plus le coût relatif par rapport à la nuance RS est important et donc plus le domaine où l'utilisation de la nuance HSS a un intérêt économique est restreint.

Comparaison des conditions d'appuis

Dès à présent, seule une colonne bi-appuyée a été considérée. L'objectif de cette sous-section est d'analyser l'impact des conditions d'appuis sur les résultats. Les résultats pour une colonne HEA et une nuance HSS S500 sont repris à la FIGURE 4.20 suivante.

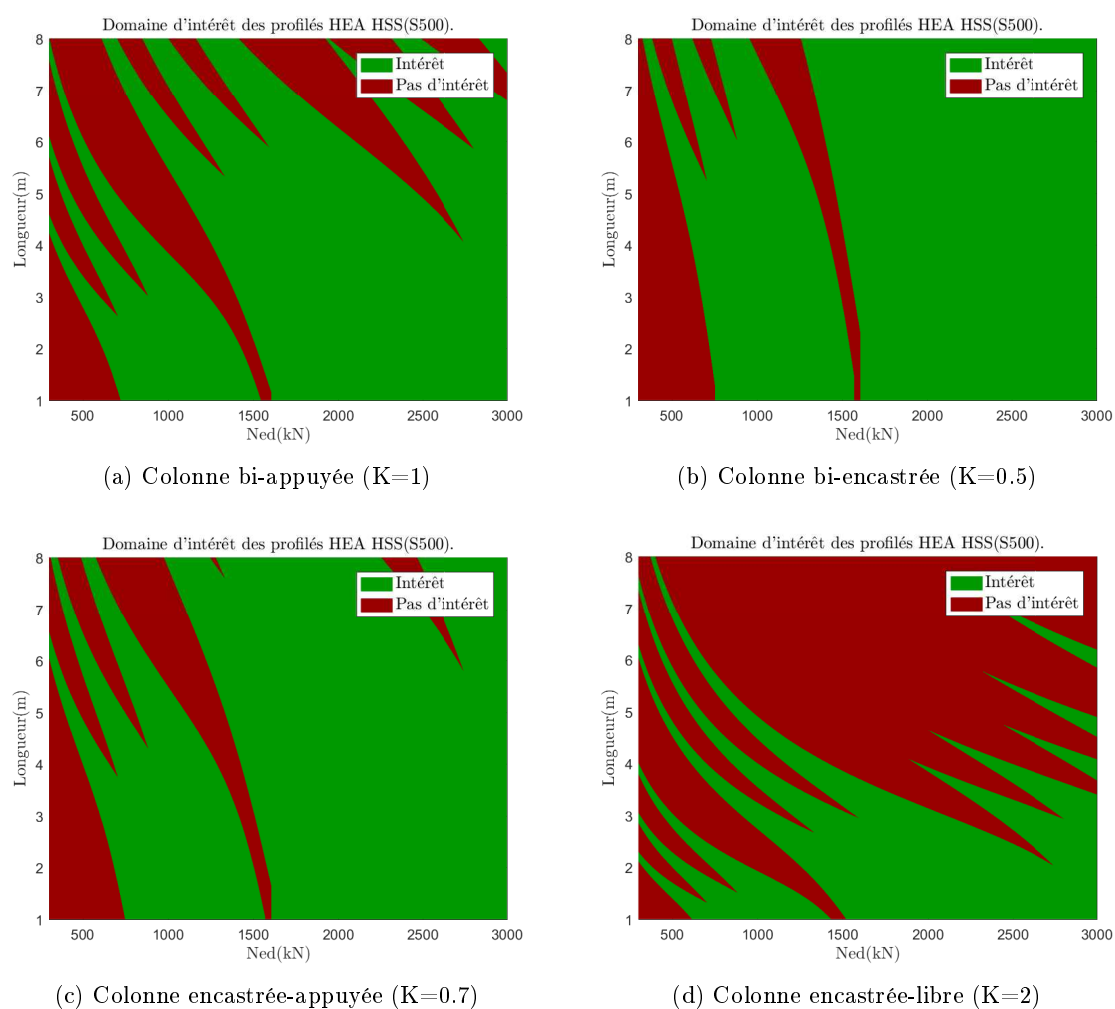


FIGURE 4.20 – Influence des conditions d'appuis de la colonne sur les résultats d'un élément HEA en compression pure (nuance HSS : S500).

Le coefficient K est le coefficient de flambement de la colonne déterminé par les conditions d'appuis. Plus ce coefficient est important, plus la portion de cette colonne susceptible de partir en instabilités (flambement par flexion) est grande. C'est ce qui explique les résultats obtenus à la FIGURE 4.20. A l'inverse, si le coefficient de flambement K est proche de 0, on se retrouve dans le cas où c'est la résistance en section qui gouverne le dimensionnement puisque l'élément n'est quasiment plus susceptible de partir en instabilités (flambement par flexion). Lorsque l'on considère un coefficient de flambement de 0.05 (le flambement est quasiment empêché), on obtient

les résultats repris à la FIGURE 4.21 suivante.

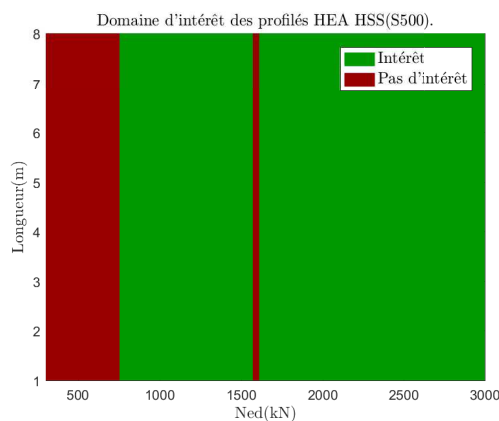


FIGURE 4.21 – Résultats pour un élément en compression pure avec un $K=0.05$.

Comme attendu, les mêmes résultats sont obtenus que ceux à la section 4.2.2 pour des éléments empêchés de flamber ou ceux obtenus pour les éléments tendus.

En conclusion de cette comparaison, l'intérêt de la nuance HSS par rapport à la nuance RS sera d'autant plus grand que le coefficient de flambement K sera petit. En d'autres termes, plus le risque d'instabilités sera grand (élément élancé), moins l'utilisation d'un acier HSS aura de chance d'avoir un intérêt économique. En effet, le passage d'une nuance RS à une nuance HSS a pour effet de diminuer la section du profilé requise pour une même charge appliquée mais cela augmente l'élancement de l'élément et donc le risque de flambement.

Choix de l'axe de flambement

Jusqu'à présent, seul le flambement d'axe fort a été envisagé considérant que le flambement d'axe faible était empêché à chaque fois. Les résultats obtenus pour l'axe faible pour une colonne bi-appuyée de type HEA pour la nuance S500 sont comparés à ceux de l'axe fort à la FIGURE 4.22 suivante.

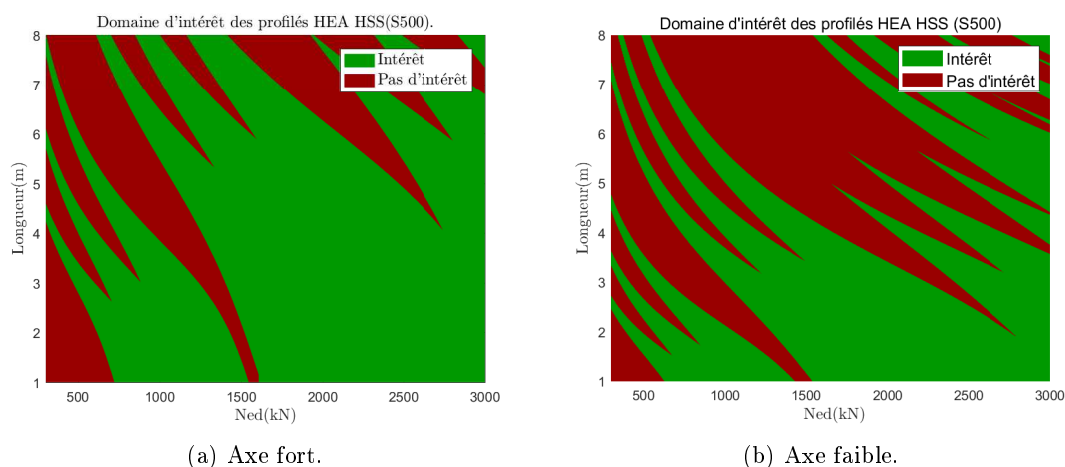


FIGURE 4.22 – Comparaison des résultats en fonction de l'axe de flambement pour des profils HEA et la nuance S500 en compression pure.

Au vu des résultats de la FIGURE 4.22, il semblerait qu'il y ait moins d'intérêt lorsque le flambement selon l'axe faible n'est pas empêché. Il est utile de préciser que la résistance des divers profilés est moindre selon l'axe faible que selon l'axe fort. De ce fait, les courbes européennes de flambement marquant la limite d'utilisation des divers profilés sont plus rapprochées. Ce rapprochement multiplie ainsi les zones ne présentant pas d'intérêt économique de l'utilisation de la nuance HSS. La conclusion de cette comparaison est donc que l'intérêt de la nuance HSS, S500 en l'occurrence, est moindre lorsque le flambement selon l'axe faible n'est pas empêché.

Influence du type de profilés laminés choisi

Une dernière comparaison pouvant être réalisée est celle du type de profilé laminé utilisé. En effet, l'ensemble des discussions pour un élément en compression pure a été réalisé pour des profilés HEA. L'objectif de cette dernière comparaison est de voir si les profilés HEB, HEC ou HEM amènent à des conclusions distinctes de celles observées pour le profilé HEA ou non. Les résultats pour des profilés HEA et la nuance S500 sont repris à la FIGURE 4.23.

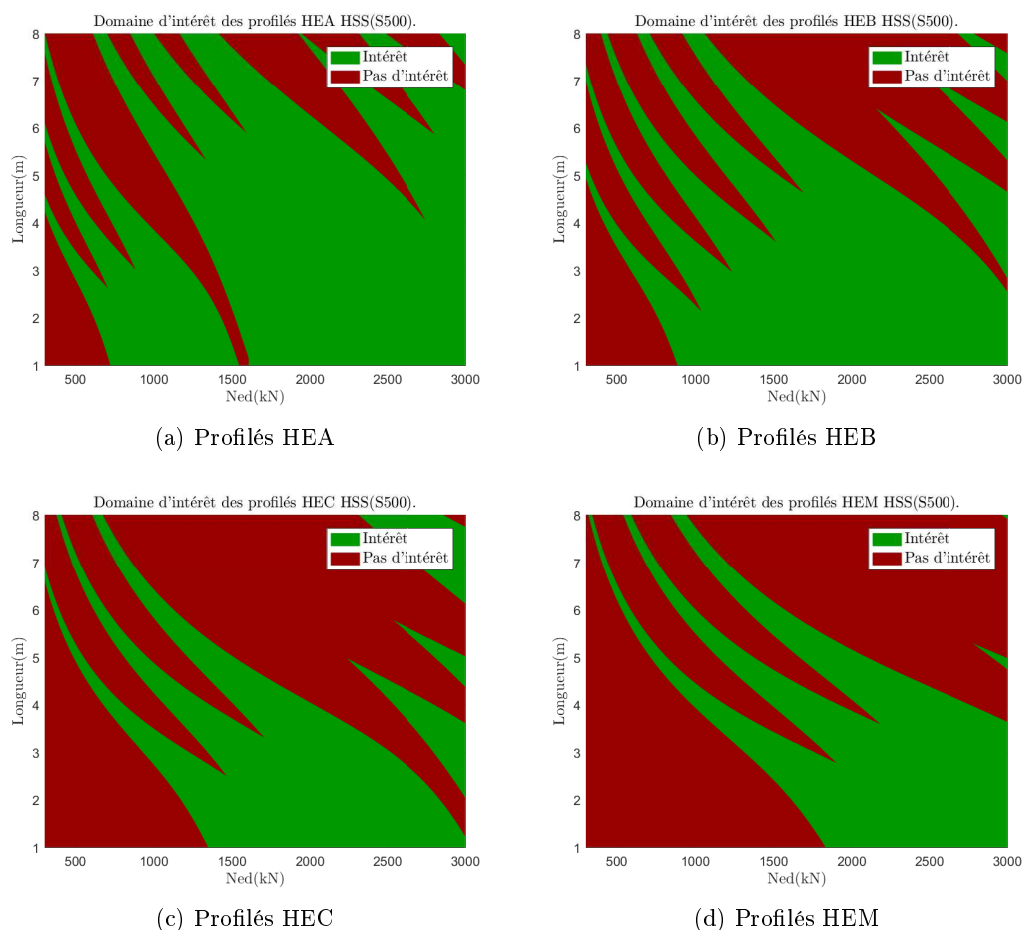


FIGURE 4.23 – Influence du choix de la gamme de profilés sur l'intérêt pour un élément en compression pure (colonne bi-appuyée, nuance HSS S500 et flambement selon l'axe fort).

De façon analogue aux conclusions établies dans la partie du rapport relative aux éléments en traction pure, plus la section du premier profilé du catalogue est importante plus l'intérêt

de la nuance HSS est restreint. En effet, tant que $N_{ed} < N_{b,rd,S355,1er\ profilé}$, les deux designs requièrent le premier profilé du catalogue. Il n'y a donc pas lieu de passer à une nuance HSS puisqu'on a pas de réduction de matière et que le coût relatif est supérieur à l'unité.

Cependant, comme expliqué dans le chapitre méthodologie et pour les éléments en traction pure, lorsqu'on passe d'une gamme à l'autre, l'intérêt économique de la nuance HSS diminue mais cette conclusion n'est valable que pour le domaine qui a été considéré. Dans les faits, si la borne supérieure de l'intervalle de charges est suffisamment augmentée, les gammes de profilés telles que les HEM ou les HD en acier HSS risquent d'avoir plus d'intérêt. En effet, étant donné leur massivité plus importante, ils pourront reprendre des niveaux de chargement plus grands. La FIGURE 4.24 représente les résultats pour la gamme de profilés HD et la nuance HSS S500 pour deux intervalles de charges distincts afin d'illustrer ce qu'il vient d'être expliqué.

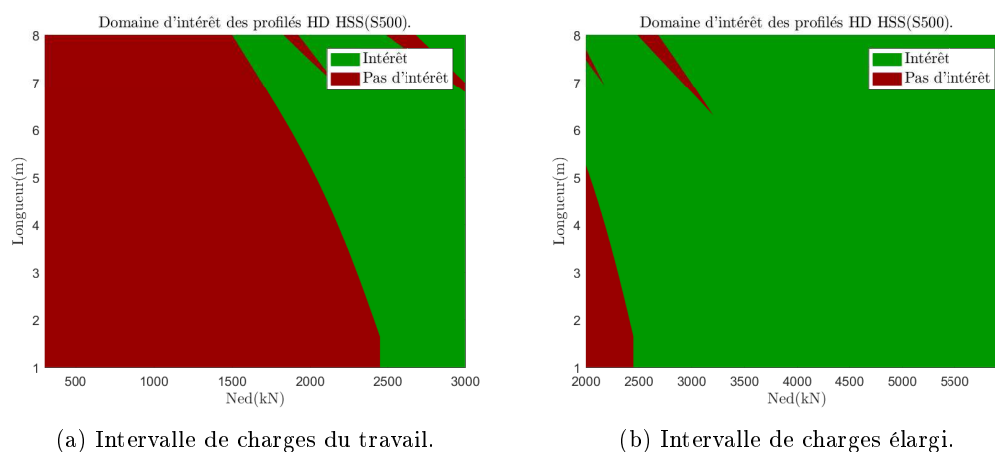


FIGURE 4.24 – Comparaison des domaines de charges pour les résultats de la gamme de profilés HD en compression pure.

La FIGURE 4.24 illustre bien le fait que la gamme de profilés HD possède également des zones pour lesquelles la nuance S500 a un intérêt économique mais pour des applications avec des niveaux de chargement bien plus importants.

4.2.4 Etablissement d'un critère limite d'utilisation d'un profilé

L'idée de cette sous-section est de déterminer un critère afin de déterminer les limites d'utilisation de chaque profilé de la gamme considérée, cela permettra de fournir à l'ingénieur ou au concepteur un moyen d'obtenir le profilé optimal requis rapidement. En effet, l'objectif est de fournir des aides à l'ingénieur ou au concepteur pour qu'il détermine rapidement si il y a un intérêt de passer à une nuance HSS ou non.

Le calcul le plus fastidieux est la détermination du profilé optimal (design) pour les deux nuances avant d'évaluer l'intérêt grâce au rapport des poids (relation (3.2)). Ce calcul pourrait être facilité grâce à des graphiques reprenant les limites d'utilisation des différents profilés. L'idée de

tracer ces limites d'utilisation provient du fait que la première observation réalisée est que lorsque l'on se trouve sous la limite d'utilisation du premier profilé de la gamme en acier RS, il n'y a pas d'intérêt de passer à une nuance HSS. Ensuite, cette idée a été généralisée à l'entièreté des profilés de la gamme afin de fournir les graphiques en question.

Un profilé résiste tant que l'élancement réduit $\bar{\lambda}$ de la colonne est telle que :

$$\frac{N_{ed}}{N_{pl,rd}} < \beta \cdot \chi(\bar{\lambda})$$

où, χ est le coefficient de pénalisation de la résistance permettant de prendre en compte les instabilités de l'élément (flambement) et β est le coefficient de pénalisation permettant de prendre en compte les instabilités locales (voilement) comme cela a été défini précédemment.

Afin de regrouper l'expression du χ en une formule, la procédure classique va être regroupée de la façon suivante :

$$\phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2) = \frac{\alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2)}{2} + \frac{\bar{\lambda}^2}{2} + \frac{1}{2}$$

et donc,

$$\chi = \frac{1}{(\sqrt{(\frac{\alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2)}{2} + \frac{\bar{\lambda}^2}{2} + \frac{1}{2})^2 - \bar{\lambda}^2} + \frac{\alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2)}{2} + \frac{\bar{\lambda}^2}{2} + \frac{1}{2})} \leq 1$$

Il est à noter que $N_{pl,rd}$, le coefficient β et le coefficient α (dépendant de la courbe européenne de flambement suivie) sont dépendants du profilé considéré.

En toute généralité, la limite d'utilisation d'un profilé est ainsi déterminée grâce à la relation suivante.

$$\boxed{\frac{N_{ed}}{N_{pl,rd}} < \frac{\beta}{(\sqrt{(\frac{\alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2)}{2} + \frac{\bar{\lambda}^2}{2} + \frac{1}{2})^2 - \bar{\lambda}^2} + \frac{\alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2)}{2} + \frac{\bar{\lambda}^2}{2} + \frac{1}{2})} \leq 1} \quad (4.3)$$

Une fois le premier élancement réduit $\bar{\lambda}$ ne vérifiant plus la relation ci-dessus connu, on peut connaître la longueur limite de la colonne correspondante via la relation suivante.

$$\bar{\lambda} = \frac{L f l}{i \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

et donc,

$$L = \bar{\lambda} \frac{i \cdot \pi}{K} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Grâce à la relation (4.3), il est assez aisé d'obtenir les graphiques souhaités numériquement. En guise d'exemple, La FIGURE 4.25 reprend les limites d'utilisation des profilés de la gamme HEA bi-appuyés pour les nuances S355 et S500 (flambement d'axe fort).

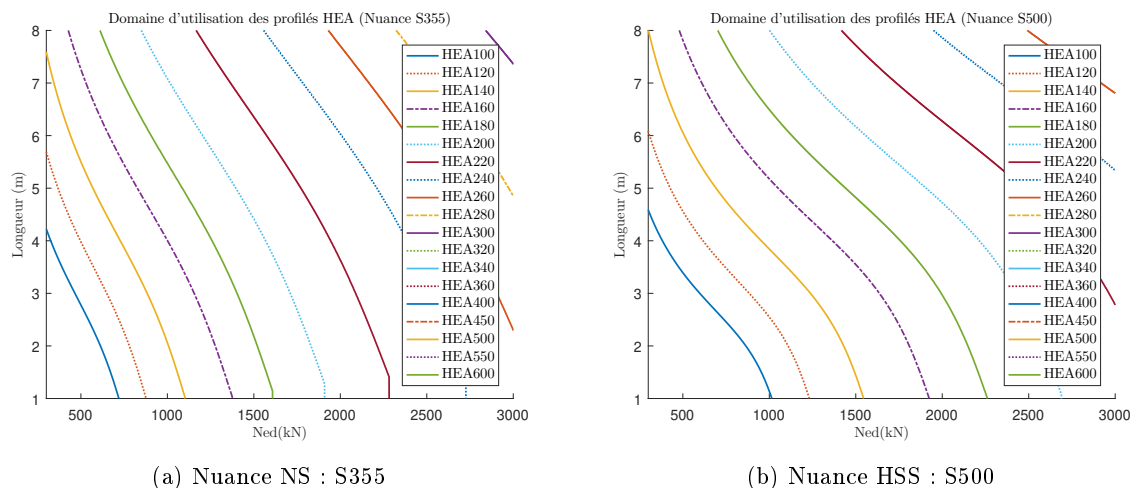


FIGURE 4.25 – Limites d'utilisation des profils HEA bi-appuyés pour les nuances S355 et S500 (flambement d'axe fort).

4.2.5 Méthodes d'évaluation de l'intérêt économique d'une nuance HSS

Méthode 1 : méthode déterminant directement les profils requis

L'ingénieur ou le concepteur voulant déterminer l'intérêt économique d'une nuance HSS peut ainsi connaître assez rapidement les profils optimaux pour les deux nuances qu'il désire comparer. Connaissant les deux profils requis et le coût relatif courant entre ces deux nuances comparées, il pourra savoir directement si il y a un intérêt économique ou non de passer à la nuance HSS par la condition (3.2). Cependant, lorsque le couple (N_{ed}, L) est tel qu'il est très proche d'une des limites d'utilisation d'un profilé, il est parfois difficile de déterminer graphiquement le profilé requis. La méthode numérique sera alors privilégiée par rapport à la méthode graphique. Dans le cadre de ce travail, un code MATLAB déterminant l'intérêt économique d'une nuance HSS pour une colonne en compression pure a été implémenté.

Afin d'illustrer la méthode suivie par un concepteur, voici un exemple.

Soit une colonne en compression pure, divers demandes sont adressées à l'utilisateur afin de connaître la longueur de la colonne, les conditions d'appuis,... etc du cas d'étude. Un exemple de questions/réponses est repris à la FIGURE 4.26 suivante :

```

Quelle est la longueur de la colonne (en m)?7
Quels sont les conditions d'appuis?
1: Bi-appuyé
2: Bi-encasté
3: Appuyé-encasté
4: Encasté-libre
1
Que vaut la charge utile (sans poids propre) appliquée sur la colonne (en kN)?500
Pour quelle nuance d'acier haute performance voulez-vous étudier l'intérêt? S500
Quelle gamme de profilés voulez-vous étudier?
1: HEA
2: HEB
3: HEC
4: HEM
5: Tous
1
Selon quel axe?
1: Axe fort
2: Axe faible
1|

```

FIGURE 4.26 – Exemple de questions et réponses correspondantes de l'utilisateur.

Une fois que l'utilisateur a répondu à ces questions, le programme se lance et fournit les deux figures suivantes.

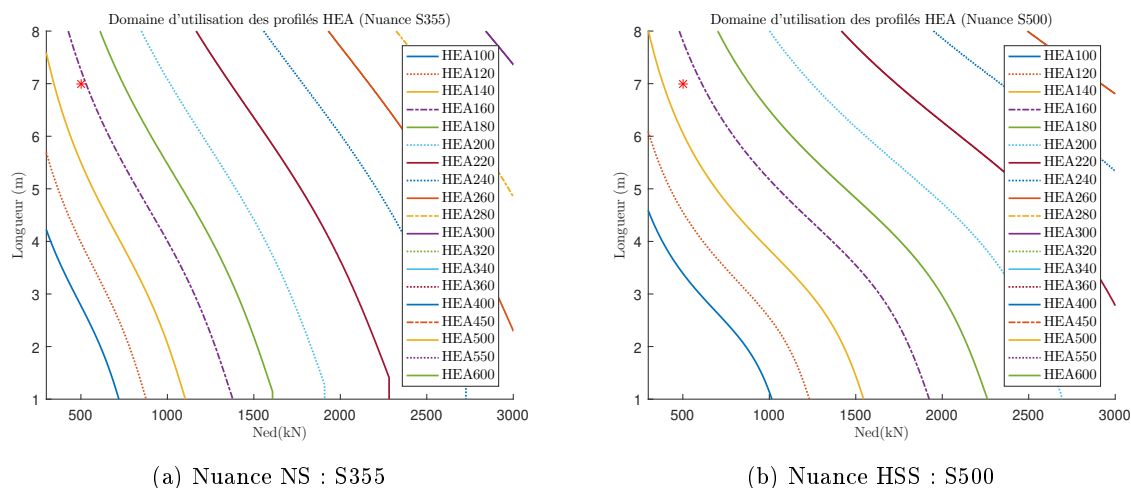


FIGURE 4.27 – Figures fournies par le code.

L'utilisateur connaît donc les deux profils requis pour les deux nuances graphiquement mais également numériquement puisque le code retourne ceci :

```

Le profilé requis avec du S355 est: HEA160
Le profilé requis avec du S500 est: HEA160
Que vaut le coût relatif de la nuance HSS par rapport à la nuance S355? 1.187
Le rapport de poids des deux profilés requis vaut: 1 il n'y a donc pas d'intérêt !
>> |

```

FIGURE 4.28 – Demande du rapport de coûts à l'utilisateur et résultat.

Grâce à cette routine implémentée dans MATLAB, l'utilisateur a donc un outil graphique et précis lui permettant de déterminer si pour un élément en compression seule il y a un intérêt ou non de passer à une nuance HSS.

Méthode 2 : méthode donnant directement le rapport de poids entre deux designs

A l'inverse de la méthode précédente, cette seconde méthode ne permettra pas de déterminer quels sont les profilés requis pour les deux designs mais déterminera directement si il y a un intérêt économique ou non de passer à une nuance HSS donnée.

Cette seconde méthode consiste à représenter le rapport de poids entre les deux profilés requis. L'utilisateur pourra ainsi sur base du coût relatif de la nuance HSS par rapport à la nuance RS et du graphique déterminer si la nuance HSS a un intérêt économique ou non pour un cas d'étude concret. En guise d'exemple, les rapports de poids pour des colonnes bi-appuyées de type HEA susceptibles de flamber selon leur axe fort et pour la nuance HSS S500 sont donnés à la FIGURE 4.29.

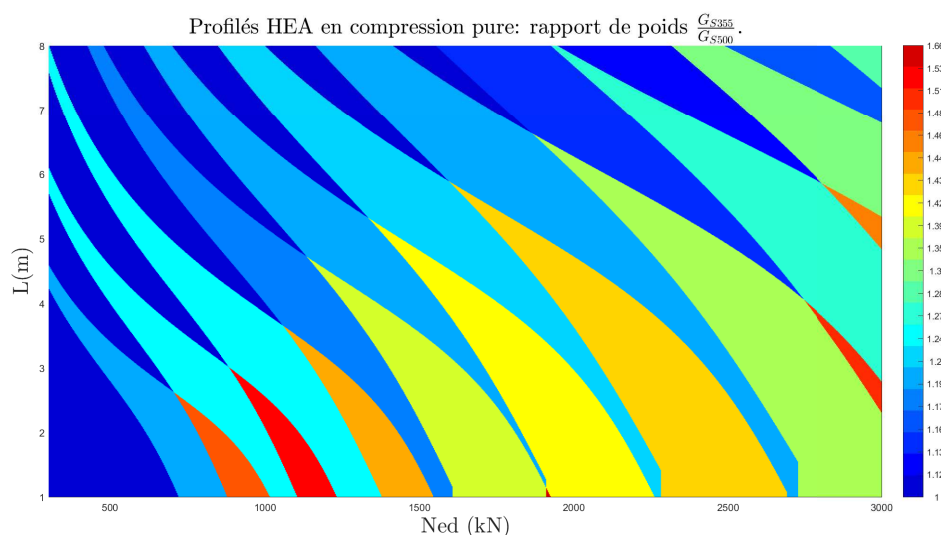


FIGURE 4.29 – Rapports d'aires pour une colonne bi-appuyée HEA (flambement d'axe fort) et une nuance HSS S500.

Les autres rapports de poids pour les autres nuances HSS, les autres conditions d'appuis et les autres gammes de profilés sont repris dans l'Annexe B.

4.3 Eléments fléchis

Cette troisième partie de l'étude locale du travail concerne l'étude de l'intérêt des aciers à haute limite d'élasticité sur un élément en flexion pure cette fois.

Lorsqu'on parle d'éléments en flexion pure, on se réfère à des éléments de type poutre. La poutre est, avec la colonne, l'élément structural le plus courant dans la construction. La fonction première de la poutre est de reprendre les charges transversales et de les transmettre aux colonnes qui vont les acheminer jusqu'aux fondations.

Etant donné que le plan de chargement coïncide avec le plan de symétrie de la poutre pour des sections laminées en double T, la poutre n'est pas soumise ni à un effort axial ni à de la torsion (le centre de gravité = centre de torsion). Les deux seuls efforts que l'on peut retrouver dans ce type d'éléments se résument donc à de la flexion et à de l'effort tranchant³.

A la différence des colonnes comprimées ou tendues, étudiées dans les sections précédentes, la poutre doit respecter des conditions de service en plus de présenter une résistance suffisante, c'est-à-dire que sa déformation est limitée selon un critère de flèches fixé.

Ces conditions de service (ELS) sont dépendantes uniquement de l'inertie du profilé considéré et du module de Young. Etant donné que les aciers HSS et les aciers RS présentent le même module de Young et puisque les conditions de service sont indépendantes de la limite d'élasticité du matériau, les domaines dans lesquels les conditions de service gouverneront ne présenteront pas d'intérêt de passer à l'utilisation d'une nuance HSS. En effet, dans ces domaines gouvernés par les ELS, le profilé requis pour la nuance RS et la nuance HSS sera le même.

Au cours de cette étude d'éléments en flexion pure, l'évaluation de l'intérêt des aciers HSS pour des profilés laminés sera donc réalisée en identifiant les domaines gouvernés par les ELS et ceux gouvernés par les ELU.

Pour ce faire, les poutres suivantes seront considérées :

- Les poutres bi-appuyées isostatiques
- Les poutres bi-encastées hyperstatiques

Ces deux types de poutres sont soumises à une charge uniformément répartie. Cependant, cela n'est valable que pour les poutres secondaires comme expliqué dans le chapitre relatif à la méthodologie. En effet, les poutres primaires sont soumises à un chargement de type ponctuel et non réparti. Une sous-section étudiera l'influence de ce changement de chargement sur les résultats obtenus.

3. Explications issues du cours d'éléments de structures métalliques du Prof. J-P JASPART (Université de Liège) [9]

4.3.1 Simulations numériques

Afin de justifier ou non l'intérêt économique de l'acier HSS pour un élément en flexion pure, un code MATLAB a été implémenté. L'influence de la prise en compte ou non des instabilités (déversement dans ce cas) sera étudiée pour chaque type de poutres considéré.

Comme ça a été le cas pour le reste du rapport, l'ensemble des codes a été vérifié à la main afin de s'assurer de la fiabilité des résultats du chapitre.

Variables, données

Les différentes variables du code sont les suivantes :

- Les nuances d'aciers HSS considérées à savoir S500, S550, S620 et S690.
- La longueur de la poutre $L \in [2\ 12]m$ pour la poutre secondaire et $L \in [2\ 18]m$ pour la poutre primaire
- La charge pondérée uniformément répartie appliquée sur la poutre secondaire $q_{ed} \in [1\ 100]kN/m$ et les charges ponctuelles appliquées sur la poutre primaire $R \in [50\ 300]kN$
- Les coûts relatifs des différentes nuances d'acier : $\frac{c_{S500}}{c_{S355}} = 1.187$, $\frac{c_{S550}}{c_{S355}} = 1.245$, $\frac{c_{S620}}{c_{S355}} = 1.321$ et $\frac{c_{S690}}{c_{S355}} = 1.394$.
- La gamme de profilés étudiée IPE, HEA ou HEB.

Organigramme du code

L'organigramme général des codes évaluant l'intérêt des aciers HSS pour un élément en flexion seule est repris à la FIGURE 4.30 suivante.

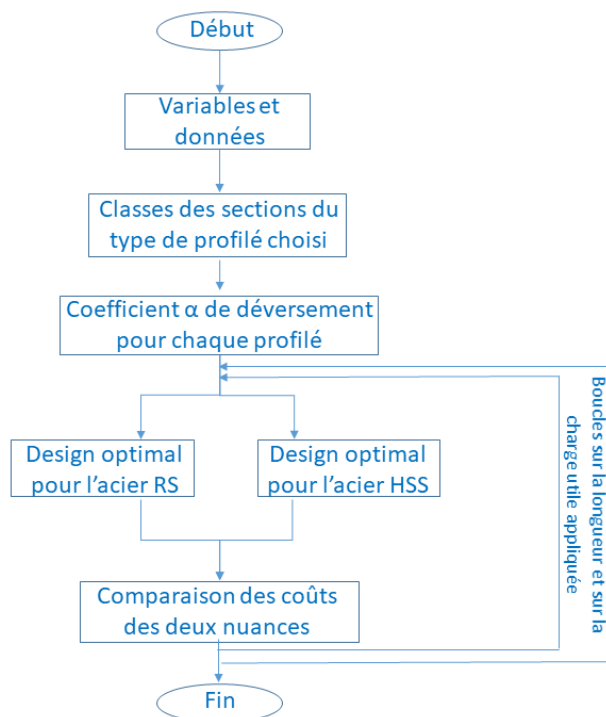


FIGURE 4.30 – Organigramme général des codes pour des éléments en flexion pure.

Il est à noter que dans ce cas d'étude, des critères aux ELS (limites de flèches) interviennent dans les designs et sont parfois prédominants sur les critères aux ELU. La vérification aux ELS se fait en utilisant des charges non-pondérées (q_{ek}) obtenues en divisant les charges de design (q_{ed}) par un coefficient de sécurité moyen de 1.4.

Les classes de section en flexion pure ainsi que les coefficients de déversement ont été déterminés sur base de l'Eurocode 3. A la différence des courbes européennes de flambement, les courbes de déversement restent inchangées peu importe la nuance d'acier considérée selon la nouvelle version des normes.

Suite à diverses simulations numériques réalisées en suivant la procédure de l'Eurocode 3, certains résultats obtenus pour les cas prenant en compte les instabilités étaient aberrants. En effet, dans certaines zones très localisées, la résistance d'un profilé en acier HSS était inférieure à la résistance d'un profilé en acier RS ce qui n'a pas de sens physique. Cela provenait des formules de $\chi_{LT,mod}$ ([1]), facteur de pénalité modifié permettant la prise en compte du déversement dans le calcul de la résistance en tenant compte de l'allure du diagramme des moments. Il a été décidé de négliger cette modification du facteur de pénalité χ_{LT} puisque ces formules ne sont pas adaptées aux aciers HSS et sont absentes de la nouvelle norme.

Les éléments de classe 4 en flexion pure ont été supprimés du catalogue étant donné que leur procédure de dimensionnement est telle que leur utilisation en pratique est rendue très rare. Il en va de même pour les profilés sujets au voilement par cisaillement.

En ce qui concerne les interactions M-V pouvant apparaître dans ce type de chargement, celles-ci ont été considérées en suivant la procédure classique de l'Eurocode 3 ([1]).

4.3.2 Résultats pour des poutres secondaires bi-appuyées (isostatiques)

L'analyse élastique d'une poutre secondaire bi-appuyée fournit les valeurs utiles suivantes.

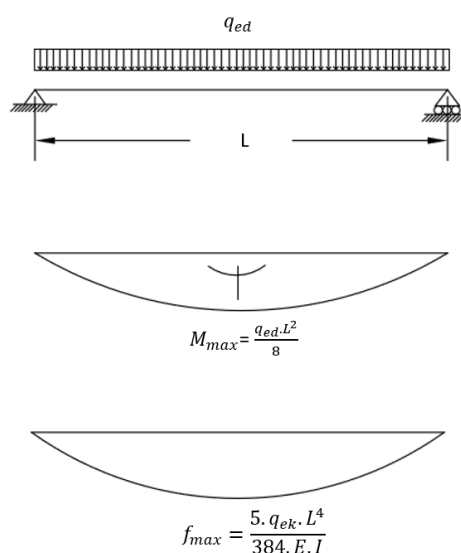


FIGURE 4.31 – Valeurs références pour une poutre bi-appuyée

Dans le cadre de l'étude des poutres isostatiques, les cas sans et avec prise en compte des instabilités vont être considérés. Dans un premier temps, seules les poutres IPE vont être étu-

diées et la limite de flèches, quant-à-elle, sera fixée à $L/300$.

Résultats sans déversement

Premièrement, le cas sans prise en compte du déversement va être étudié. C'est à dire qu'on se met dans le cas où $\bar{\lambda}_{LT} < 0.2$. Il est utile pour différentes raisons, cela va nous permettre de comprendre les résultats prenant en compte les instabilités par la suite mais aussi d'envisager un cas particulier pas si anodin que ça. En effet, en pratique, il n'est pas si rare de se retrouver dans un cas où le déversement est empêché, certains exemples peuvent être cités comme :

- Le cas fréquent où la poutre en question se trouve entre deux hourdis.⁴

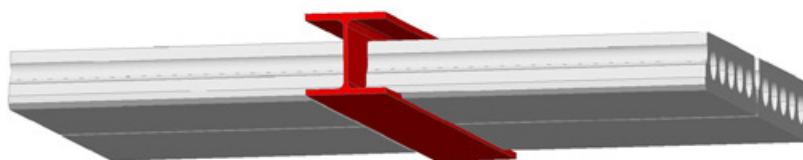


FIGURE 4.32 – Exemple d'une poutre empêchée de déverser.

- Les différentes poutres mixtes acier-béton pour lesquelles la dalle en béton empêche la semelle comprimée de déverser (zone de moments positifs).⁵

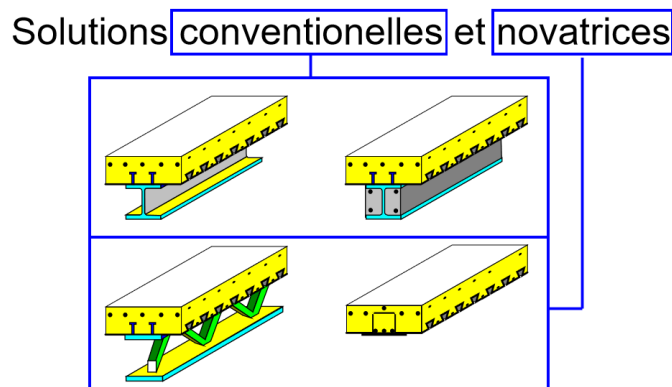
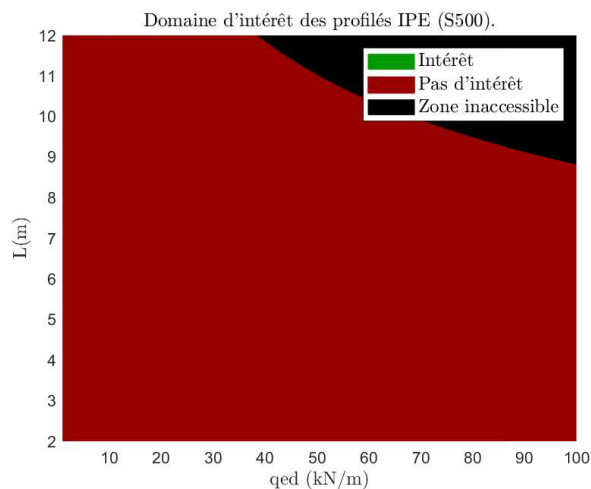


FIGURE 4.33 – Exemple de poutres mixtes empêchées de déverser [13].

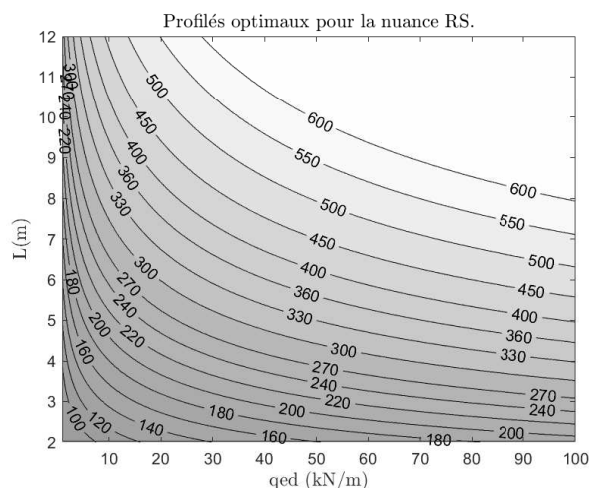
4. Image issue du site <http://www.fingo.be/dispositifs-dappui?lang=fr>

5. Image issue du cours de constructions métalliques et mixtes. (Uliege)

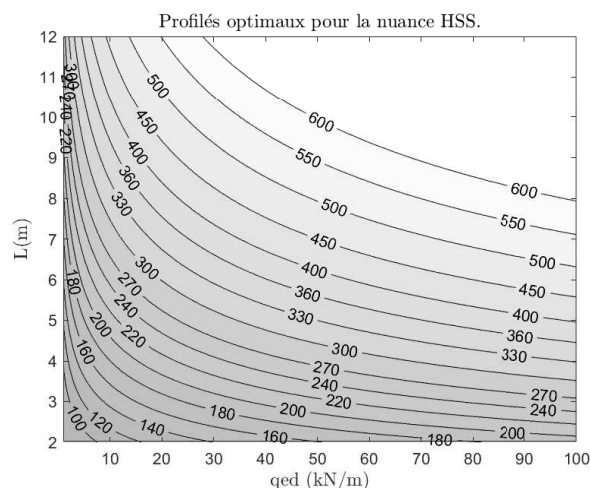
Les simulations numériques fournissent les résultats repris à la FIGURE 4.34 pour une poutre IPE empêchée de déverser.



(a) Domaines d'intérêt de la nuance S500



(b) Profils requis pour la nuance RS (S355)



(c) Profils requis pour la nuance HSS (S500)

FIGURE 4.34 – Domaine d'intérêt et profils requis pour des aciers S500 et des profilés IPE bi-appuyés en flexion pure (sans déversement).

Il est utile de spécifier pour la bonne compréhension des figures de ce chapitre que la zone inaccessible affichée représente la zone pour laquelle aucun profilé de la gamme considérée n'est capable d'atteindre. Ici, la résistance du profilé IPE600 n'est plus suffisante que pour atteindre ces couples de charges et longueurs représentées.

Il est aisé de remarquer que, pour les longueurs de poutres et pour les charges réparties considérées, il n'y a aucun intérêt de passer à l'utilisation de la nuance d'acier HSS S500 dans le cas précis d'une poutre bi-appuyée empêchée de déverser. De plus, il semblerait que les profils requis pour le design de la nuance d'acier RS et pour celui de la nuance d'acier HSS soient les mêmes.

Afin de comprendre ces résultats, il convient d'étudier plus en détail le design pour chaque couple (q_{ed}, L) :

— Design aux états limites de service ELS, le critère à vérifier est le suivant :

$$f = \frac{5 \cdot q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \leq \frac{L}{300} \quad (4.4)$$

Pour une charge $q_{ed} = 1.4 \cdot q_{ek}$ donnée, la longueur limite d'utilisation d'un profilé selon les ELS est donc donnée par :

$$L_{lim_{ELS}} = \sqrt[3]{\frac{75264 \cdot I}{q_{ed}}} \quad (4.5)$$

— Design aux états limites ultimes ELU, le critère à vérifier dans ce cas est le suivant :

$$M_{pl,rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \geq M_{ed} = \frac{q_{ed} \cdot L^2}{8} \quad (4.6)$$

Il est également possible d'isoler la longueur limite d'utilisation d'un profilé à savoir :

$$L_{lim_{ELU}} = \sqrt{\frac{8 \cdot f_y \cdot W_{pl}}{q_{ed}}} \quad (4.7)$$

Connaissant ces deux limites d'utilisation de profilés pour les ELU et ELS, il est possible de connaître les points d'intersection entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU. L'intersection entre ces deux domaines peut être établie de la façon suivante :

$$L_{lim_{ELS}} = L_{lim_{ELU}}$$

$$\sqrt[3]{\frac{75264 \cdot I}{q_{ed}}} = \sqrt{\frac{8 \cdot f_y \cdot W_{pl}}{q_{ed}}}$$

Pour la nuance RS S355, on a :

$$q_{ed}^{1/6} = \frac{\sqrt{8 \cdot 355}}{\sqrt[3]{75264}} \cdot \frac{W_{pl}^{1/2}}{I^{1/3}} = 1.262 \cdot \frac{W_{pl}^{1/2}}{I^{1/3}}$$

En élevant à la puissance 6 les deux membres de l'égalité, on a donc la valeur de la charge d'intersection en fonction du profilé considéré :

$$q_{ed} = 4.0437 \cdot \frac{W_{pl}^3}{I^2} \quad (4.8)$$

En substituant la relation 4.8 dans soit l'équation 4.5 soit l'équation 4.7, on obtient les coordonnées des points d'intersection entre les deux domaines à savoir :

$$(q_{ed}, L) = \left(4.0437 \cdot \frac{W_{pl}^3}{I^2}, 26.50 \cdot \frac{I}{W_{pl}} \right) \quad (4.9)$$

En considérant les différents profilés IPE du catalogue et connaissant l'équation des coordonnées ci-dessus, on peut donc tracer cette limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU.

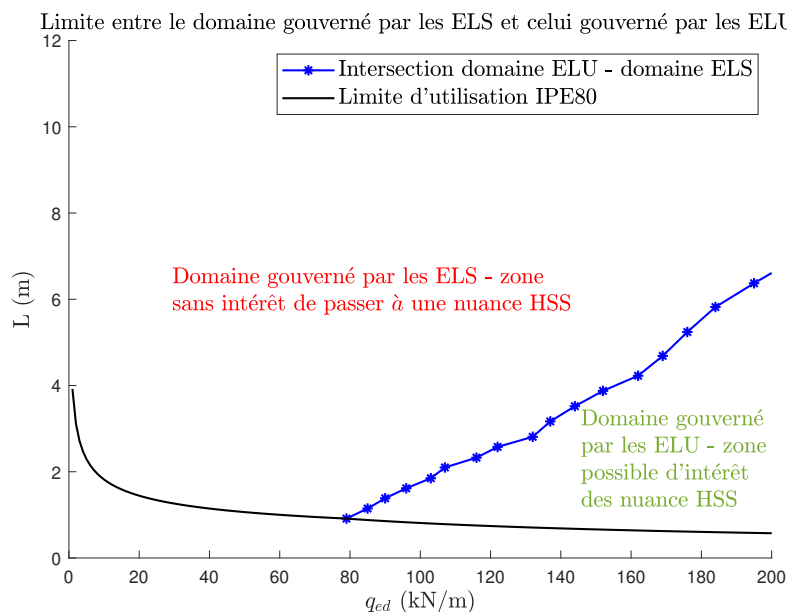


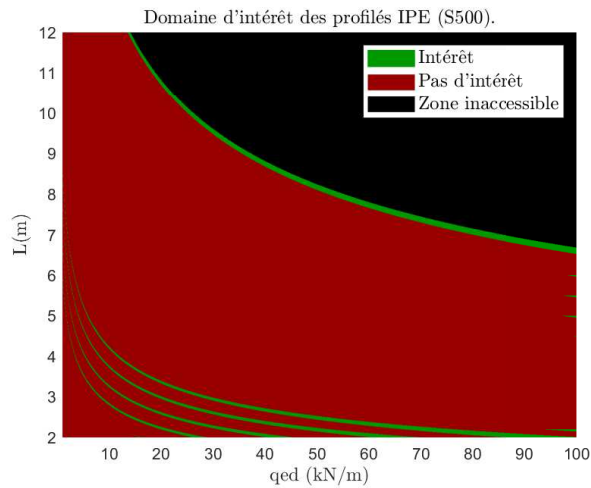
FIGURE 4.35 – Limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU pour une poutre secondaire bi-appuyée empêchée de déverser.

Au vu de cette FIGURE 4.35, force est de constater que les ELS gouvernent le dimensionnement pour tout le domaine concerné. En effet, pour des charges inférieures à $q_{ed} = 100 \text{ kN/m}$ et des longueurs supérieures à 2m sur la FIGURE 4.35, les ELS gouvernent partout. Or, étant donné que le dimensionnement aux ELS ne dépend pas de la limite d'élasticité de l'acier considéré, les profilés requis pour les deux nuances d'acier considérées seront les mêmes. C'est pour cette raison qu'il n'y a jamais d'intérêt de passer à une nuance HSS comme le montre la FIGURE 4.34. Il faudrait avoir des charges réparties pondérées appliquées sur la poutre supérieures à 100 kN/m pour commencer à observer des zones d'intérêt. En effet, au delà de cette charge, un domaine gouverné par les ELU apparaît et devient de plus en plus significatif au plus la charge répartie est importante. Toutefois, ces charges deviennent relativement importantes et ne correspondent plus à l'utilisation de ces aciers dans des bâtiments multi-étagés normaux comme cela avait été défini dans le chapitre relatif à la méthodologie.

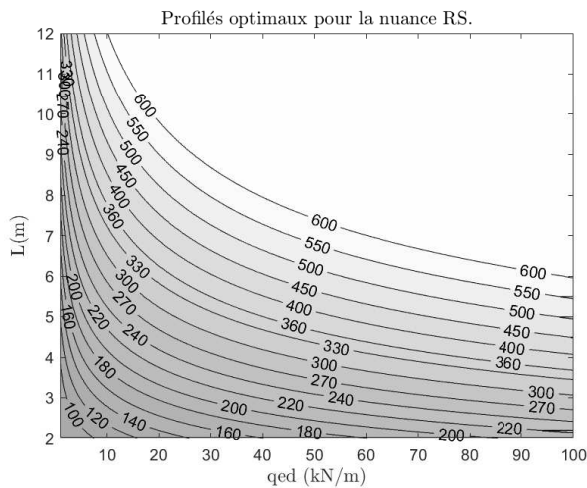
Résultats avec déversement

Deuxièmement, dans de nombreux cas, il est impossible d'empêcher le déversement. C'est pour cela que le cas dans lequel le déversement était libre a été investigué.

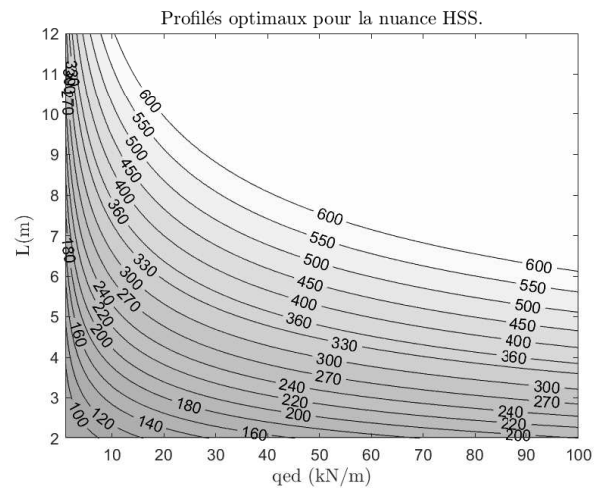
Les résultats obtenus pour des poutres IPE bi-appuyées libres de déverser sont repris à la FIGURE 4.36.



(a) Domaines d'intérêt de la nuance S500



(b) Profilés requis pour la nuance RS (S355)



(c) Profilés requis pour la nuance HSS (S500)

FIGURE 4.36 – Domaine d'intérêt et profilés requis pour des aciers S500 et des profilés IPE bi-appuyés libres de déverser.

Au vu de la FIGURE 4.36, lorsque le déversement est pris en compte, des zones d'intérêt apparaissent. Il se fait que les ELU gouvernent dans l'entièreté du domaine. En effet, la prise en compte du déversement a pour effet de rendre plus stricts les ELU et donc la dominance des ELS en est diminuée. Le nombre de profilés d'écart entre les deux designs des deux nuances comparées ont été représentés à la FIGURE 4.37 suivante.

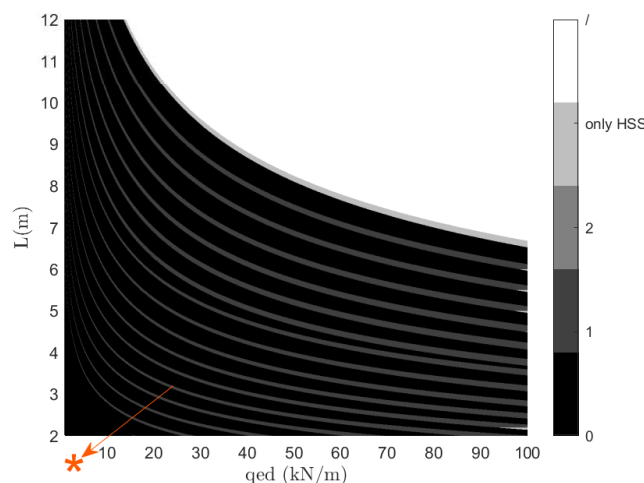


FIGURE 4.37 – Nombre de profils d'écart entre les deux designs pour une poutre bi-appuyée libre de déverser.

Au vu de la FIGURE 4.37, il existe un grand nombre de zones où il y a un profilé d'écart entre les deux designs des deux nuances comparées. De plus, une zone "only HSS" apparaît, cette zone correspond à une partie du domaine qui n'est accessible qu'en utilisant des HSS et non avec le S355. Afin d'expliquer pourquoi il n'y a qu'un nombre réduit de ces zones qui présente un intérêt, l'évolution du rapport de poids entre deux profilés IPE successifs a été représenté à la FIGURE 4.38.

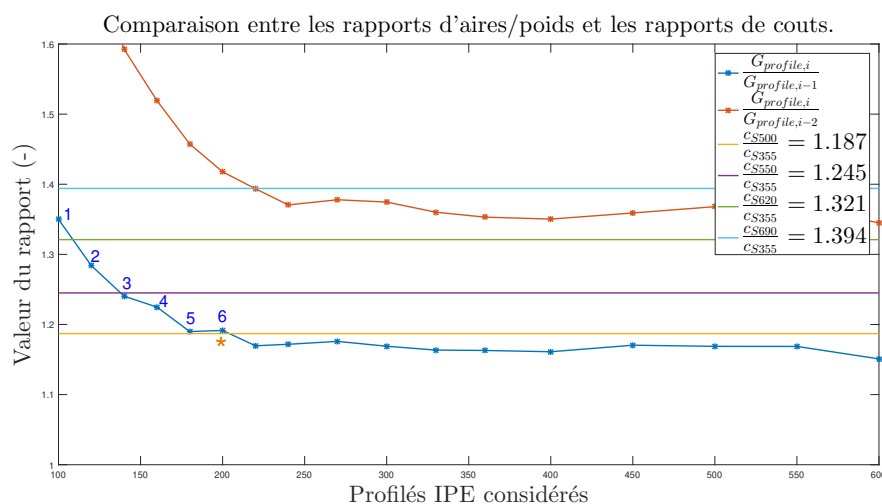


FIGURE 4.38 – Evolution du rapport de poids les deux profilés IPE requis.

La zone * sur la FIGURE 4.37 correspond à une zone pour laquelle le profilé requis de la nuance RS est l'IPE200. Le rapport de poids entre l'IPE200 et l'IPE180 est le dernier rapport de poids sur la FIGURE 4.38 supérieur au coût relatif de la nuance HSS S500. C'est pour cette raison que cette zone à un profilé d'écart soit la dernière qui soit verte sur la FIGURE 4.36 (a) (la nuance HSS S500 a un intérêt économique). La condition (3.2) explique donc qu'il n'y ait pas d'intérêt économique de passer à la nuance S500 pour tout le reste du domaine.

En conclusion, lorsque les instabilités (déversement) sont prises en compte, des zones possibles d'intérêt de la nuance HSS apparaissent. Cela semble paradoxal puisque cela rajoute une contrainte dans le dimensionnement. Cela vient du fait que les critères aux ELU avec prise en compte du déversement sont plus dominants sur les critères aux ELS. Précédemment, les critères aux ELS étaient toujours dominants sur les critères aux ELU sans prise en compte du déversement. L'inégalité d'importance des critères sur ce dimensionnement peut donc être écrite de la sorte :

$$\text{Critère ELU avec déversement} > \text{Critère ELS} > \text{Critère ELU sans déversement} \quad (4.10)$$

Il est à noter que les normes actuelles et même futures n'établissent pas de distinction entre les coefficients de déversement pour des aciers RS et ceux pour les aciers HSS. C'est ce qui explique que les décalages entre les courbes européennes de flambement soient plus marqués que ceux des courbes de déversement. C'est pour cela que les zones à un profilé d'écart sont plus fines ici qu'en compression pure (FIGURE 4.37).

4.3.3 Résultats pour des poutres secondaires bi-encastées (hyperstatiques)

Dans un second temps, le cas des poutres bi-encastées va être envisagé puisque dans ce cas les flèches sont drastiquement réduites grâce aux encastrements bloquant la rotation aux appuis. Il serait donc probable d'obtenir des résultats plus probants dans ce cas ci.

L'analyse élastique de cette poutre donne les valeurs utiles suivantes.

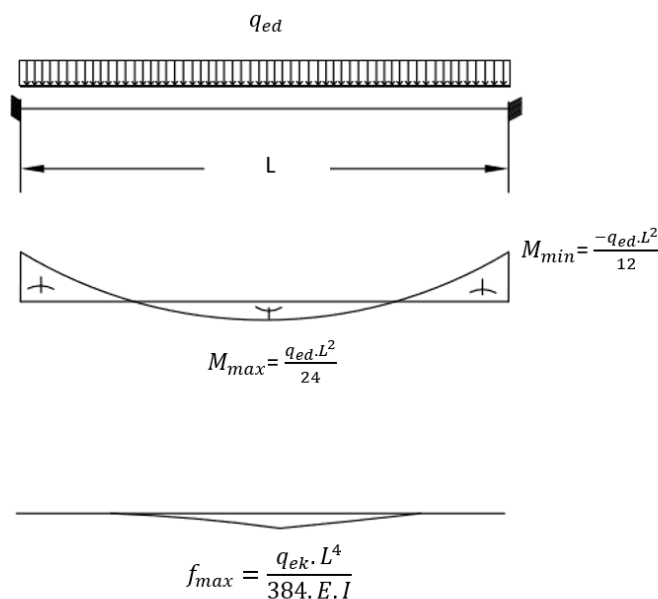


FIGURE 4.39 – Valeurs références pour une poutre bi-encastée

A l'instar des poutres bi-appuyées considérées précédemment, les cas sans et avec prise en compte des instabilités (déversement en l'occurrence) vont être considérés.

Résultats sans déversement

Les résultats pour les poutres bi-encastées empêchées de déverser sont repris à la FIGURE 4.40.

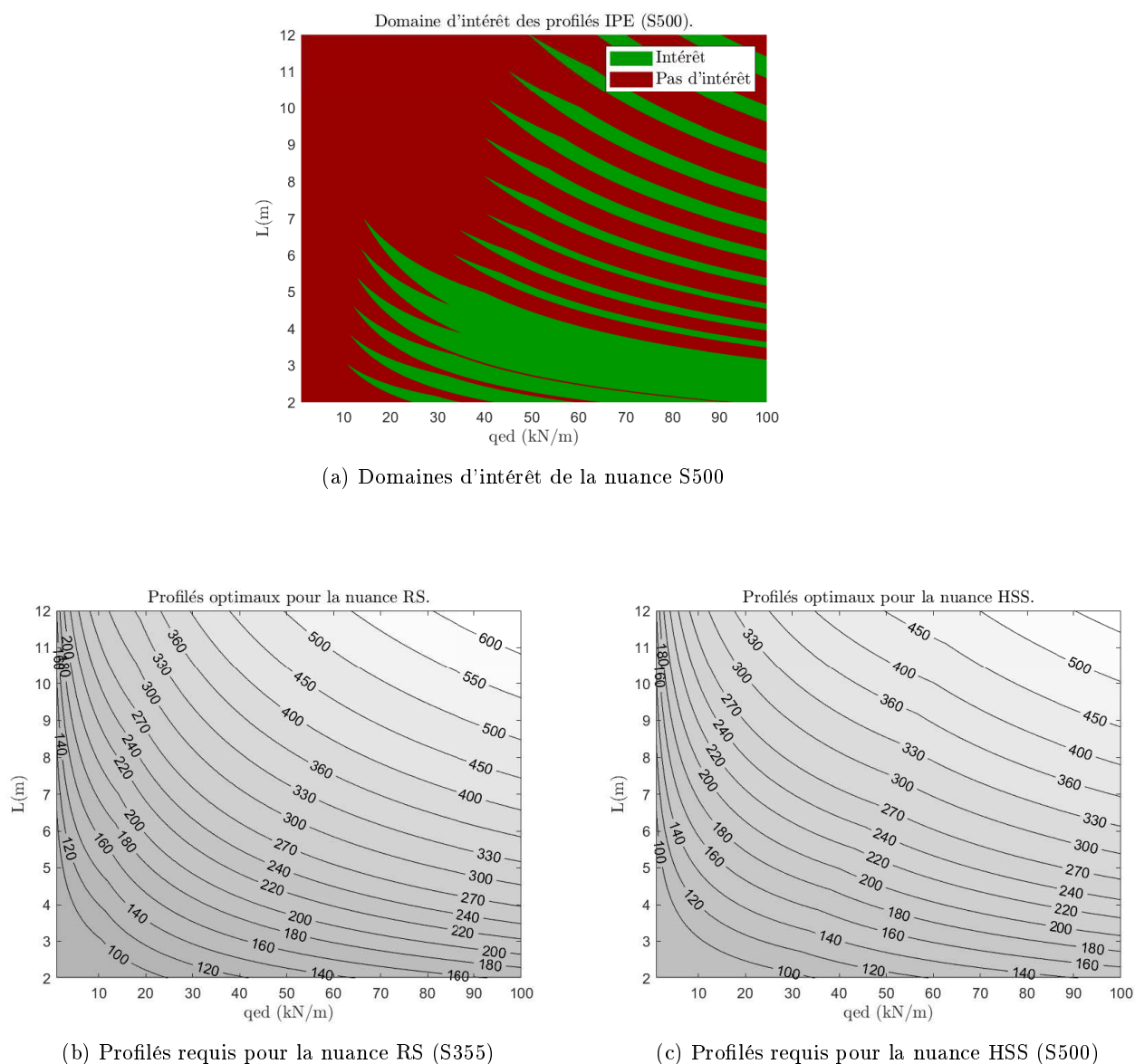


FIGURE 4.40 – Domaine d'intérêt et profilés requis pour des aciers S500 et des profilés IPE.

Au vu des résultats, le domaine d'intérêt de la nuance HSS S500 est beaucoup plus significatif dans ce cas ci que dans le précédent où la poutre était bi-appuyée. Des conclusions sur l'intérêt pourraient être intéressantes puisque, comme explicité pour les poutres isostatiques, le cas sans déversement se rencontre fréquemment dans le domaine de la construction métallique ou mixte.

La présence de zones d'intérêt ici alors qu'il n'y en avait pas dans les cas des poutres isostatiques peut s'expliquer par un raisonnement analogue à celui suivi préalablement.

En effet, le design optimal pour les deux nuances ne peut à nouveau être gouverné que par deux choses :

- Les états limites de service ELS, le critère à vérifier est le suivant :

$$f = \frac{q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \leq \frac{L}{300} \quad (4.11)$$

Pour une charge $q_{ed} = 1.4 \cdot q_{ek}$ donnée, la longueur limite d'utilisation d'un profilé aux ELS est donc donnée par :

$$L_{lim,ELS} = \sqrt[3]{\frac{376320 \cdot I}{q_{ed}}} \quad (4.12)$$

- Les états limites ultimes ELU, le critère à vérifier dans ce cas est le suivant :

$$M_{pl,rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \geq M_{ed} = \frac{q_{ed} \cdot L^2}{12} \quad (4.13)$$

Il est également possible d'isoler la longueur limite d'utilisation d'un profilé aux ELU à savoir :

$$L_{lim,ELU} = \sqrt{\frac{12 \cdot f_y \cdot W_{pl}}{q_{ed}}} \quad (4.14)$$

Connaissant ces deux limites d'utilisation de profilés pour les ELU et ELS, il est possible de connaître les points d'intersection entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU. Essayons d'établir cette intersection :

$$L_{lim,ELS} = L_{lim,ELU}$$

$$\sqrt[3]{\frac{376320 \cdot I}{q_{ed}}} = \sqrt{\frac{12 \cdot f_y \cdot W_{pl}}{q_{ed}}}$$

Pour la nuance RS S355, on a :

$$q_{ed}^{1/6} = \frac{\sqrt{12 \cdot 355}}{\sqrt[3]{376320}} \cdot \frac{W_{pl}^{1/2}}{I^{1/3}} = 0.904 \cdot \frac{W_{pl}^{1/2}}{I^{1/3}}$$

En élevant à la puissance 6 les deux membres de l'égalité, on a donc la valeur de la charge d'intersection en fonction du profilé considéré :

$$q_{ed} = 0.546 \cdot \frac{W_{pl}^3}{I^2} \quad (4.15)$$

En substituant la relation 4.15 dans soit l'équation 4.5 soit l'équation 4.7, on obtient les coordonnées des points d'intersection entre les deux domaines à savoir :

$$(q_{ed}, L) = \left(0.546 \cdot \frac{W_{pl}^3}{I^2}, 88.338 \cdot \frac{I}{W_{pl}}\right) \quad (4.16)$$

En considérant les différents profils IPE du catalogue et connaissant l'équation des coordonnées ci-dessus, on peut donc tracer cette limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU.

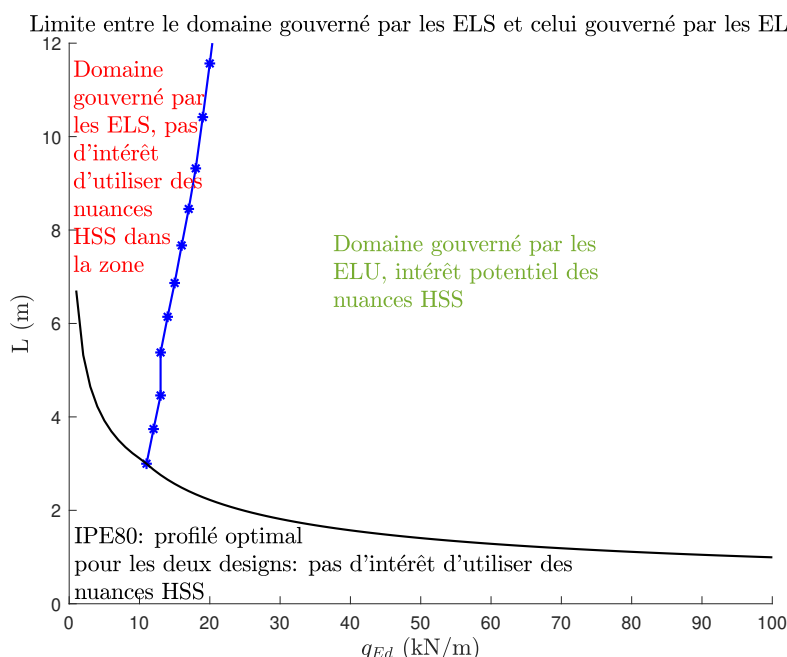


FIGURE 4.41 – Limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU pour une poutre secondaire bi-encastée empêchée de déverser.

Au vu de la FIGURE 4.41, le domaine gouverné par les ELU commence dans ce cas dès une charge répartie d'environ 10 kN/m. On a donc un domaine assez large pour lequel les aciers HSS présentent un intérêt potentiel. En effet, bien que ce soit les ELU qui gouvernent dans ce domaine, le fait qu'il y ait un intérêt ou non dépend du rapport de poids entre les deux profils requis par rapport au coût relatif de la nuance HSS (condition 3.2). Le nombre de profils d'écart entre les deux designs est représenté à la FIGURE 4.42. Il est à noter que la limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU est représentée également sur la FIGURE 4.42 afin de montrer la pertinence de cette courbe d'intersection.

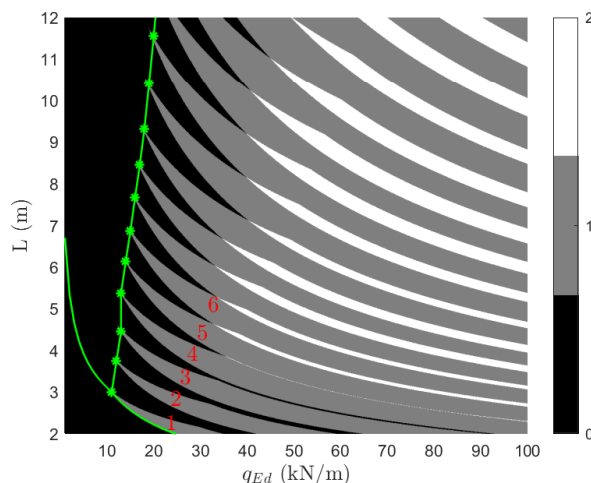


FIGURE 4.42 – Nombre de profilés d'écart entre les deux designs pour une poutre bi-encastree empêchée de déverser.

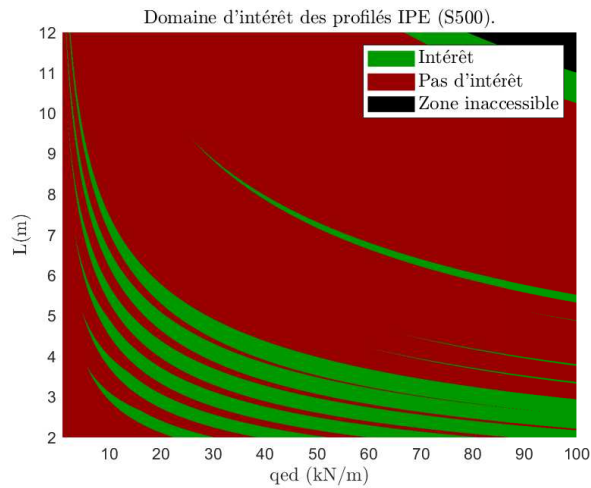
Cette FIGURE 4.42 illustre bien le fait que la limite entre domaine gouverné par les ELU et celui gouverné par les ELS délimite bien un domaine pour lequel il n'y a pas de profilés d'écart et un domaine pour lequel il existe des zones avec un ou plusieurs profilés d'écart.

De plus, cette FIGURE 4.42 montre qu'en fonction du rapport de poids des deux profilés requis par rapport au coût relatif, il est possible de trouver une zone d'intérêt de la nuance HSS très importante dans ce cas d'étude.

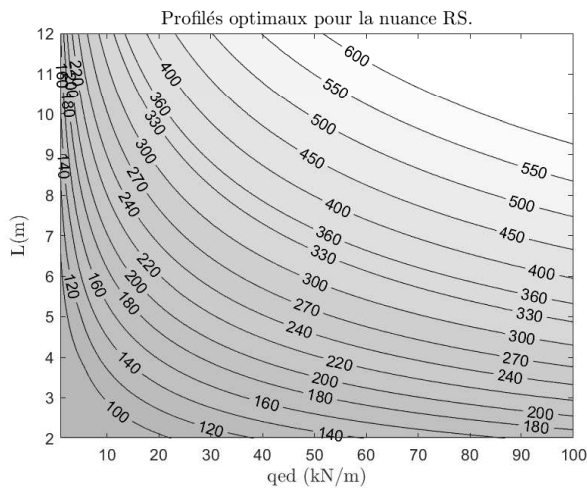
Les résultats de la FIGURE 4.40 peuvent ainsi être expliqués sur base de la FIGURE 4.38 et la FIGURE 4.42. En effet, les six premiers rapports de poids numérotés en bleu sont supérieurs à la ligne rouge sur la FIGURE 4.38, ceci explique que les six premières franges à un profilé d'écart numérotées en rouge sur la FIGURE 4.42 soient vertes (intérêt de la nuance HSS dans ces franges) sur la FIGURE 4.40. A l'inverse, les autres rapports de poids sont tous inférieurs au coût relatif de la nuance S500 sur la FIGURE 4.38. Toutes les autres franges à un profilé d'écart de la FIGURE 4.42 sont donc rouges (sans intérêt de la nuance HSS) sur la FIGURE 4.40.

Résultats avec déversement

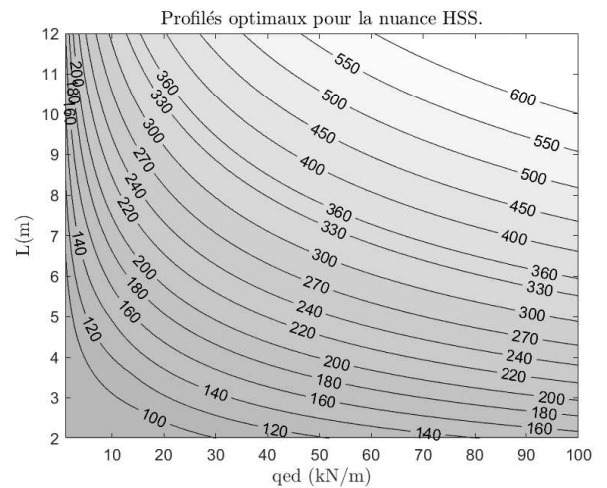
Les résultats prenant en compte le déversement des poutres hyperstatiques IPE et pour une nuance HSS S500 sont repris à la FIGURE 4.43.



(a) Domaines d'intérêt de la nuance S500



(b) Profilés requis pour la nuance RS (S355)



(c) Profilés requis pour la nuance HSS (S500)

FIGURE 4.43 – Domaine d'intérêt et profilés requis pour des aciers S500 et des profilés IPE bi-encastrés libres de déverser.

Le nombre de profilés d'écart entre le design pour la nuance RS et celui pour la nuance HSS est, à nouveau, représenté à la FIGURE 4.44 afin d'expliquer les résultats de la FIGURE 4.43.

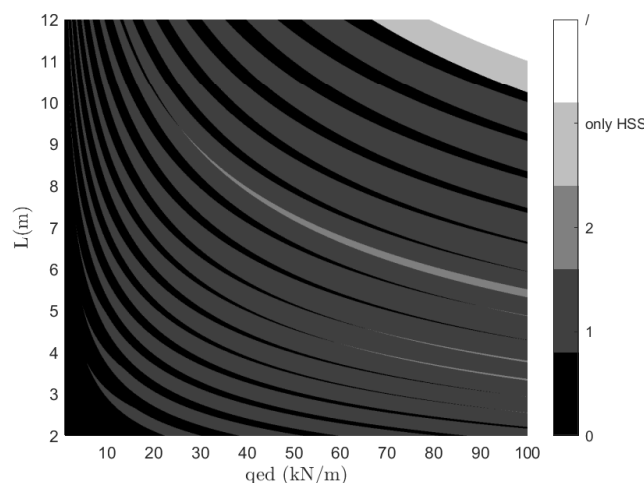


FIGURE 4.44 – Nombre de profilés d'écarts entre les deux designs.

Au vu de la FIGURE 4.44, il y a un nombre conséquent de zones possédant un profilé d'écart entre les deux profilés requis. Ces zones pourraient avoir un intérêt mais le coût relatif de la nuance S500 par rapport à la nuance S355 est relativement élevé. Les seules franges à un profilé d'écart de la FIGURE 4.44 représentées en vert (la nuance HSS a intérêt) sur la FIGURE 4.43 correspondent aux six premiers rapports de poids supérieurs au coût relatif sur la FIGURE 4.38. L'explication de ces zones d'intérêt est donc identique par rapport à celle donnée au cas précédent.

Etant donné que les ELS gouvernent moins le dimensionnement pour les poutres bi-encastrees, les résultats sont donc beaucoup plus probants que pour les poutres bi-appuyées.

4.3.4 Comparaisons de paramètres réalisées pour les poutres secondaires

Cette sous-section a pour but d'étudier l'influence des paramètres des simulations numériques réalisées sur les résultats obtenus pour les poutres secondaires isostatiques et hyperstatiques.

Les différentes comparaisons de paramètres vont être réalisées pour la cas d'une poutre secondaire bi-encastree sans déversement puisque c'est le cas présentant le plus d'intérêt potentiel.

Comparaison analyse élastique - analyse plastique

Cette sous-section a pour objectif d'étudier l'influence de passer d'une analyse élastique à une analyse plastique sur les résultats obtenus ci-dessus. Le gain de résistance obtenu par l'hyperstaticité d'une structure par redistribution des efforts peut potentiellement influencer les résultats. En effet, l'atteinte du moment de résistance au point de moment maximum obtenu par une analyse élastique ne conduit généralement pas à l'effondrement pour une poutre hyperstatique. Des rotules plastiques vont donc se former dans un premier temps là où les moments obtenus par l'analyse élastique seront les plus grands c'est-à-dire aux encastremements dans ce cas ci (comme illustré sur la distribution de moments élastique à la FIGURE 4.39). Ensuite, par redistribution

des efforts, la troisième rotule plastique va se former au centre de la poutre créant ainsi un mécanisme de ruine plastique. La redistribution des moments permet à la poutre de supporter des charges au delà de celle qui a provoqué la première rotule. Trois sections contribuent donc dès à présent à la résistance contre une seule préalablement. Il est utile de rappeler l'hypothèse qui a été émise au travers du chapitre relatif à la mise en situation à savoir que les profilés laminés à haute limite d'élasticité posséderont une ductilité suffisante que pour permettre l'analyse plastique. Il est à noter également que ce mécanisme de ruine plastique n'est atteignable que dans le cas où le profilé considéré est de classe 1. En effet, dans le cas contraire, le profilé n'aurait pas une capacité de rotation suffisante que pour former la rotule plastique. Les classes de l'âme et des semelles des profilés IPE en S500 sont repris à la FIGURE 4.45.

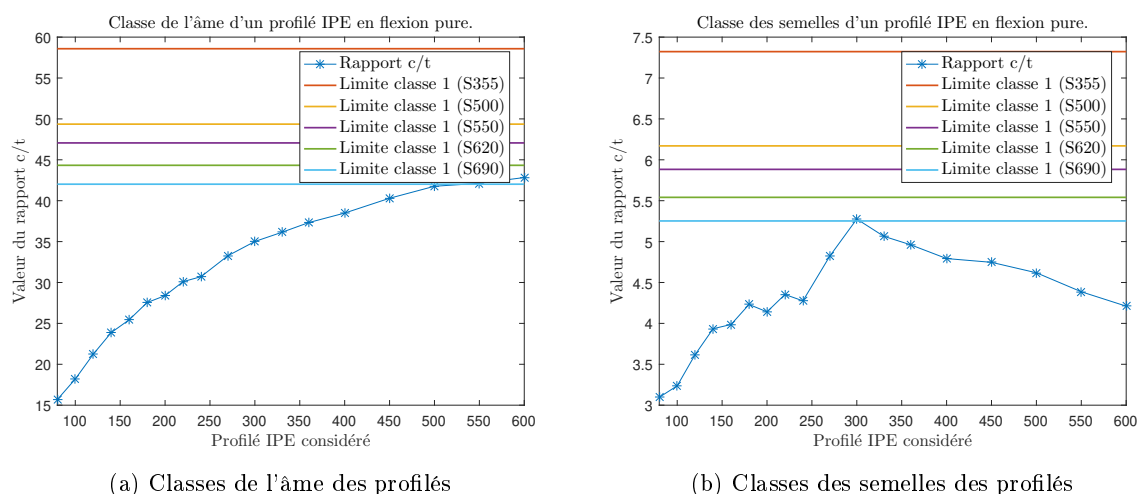


FIGURE 4.45 – Classes de l'âme et des semelles des profilés IPE en S500.

La classe de la section étant donnée par la classe maximale entre la classe de l'âme et la classe des semelles du profilé, seuls 3 profilés IPE seront de classe 2 pour la nuance S690. Un calcul plastique peut donc être réalisé sans problème pour la nuance S500. En réalisant un calcul plastique, il est possible d'établir la charge maximale que peut reprendre la poutre hyperstatique.

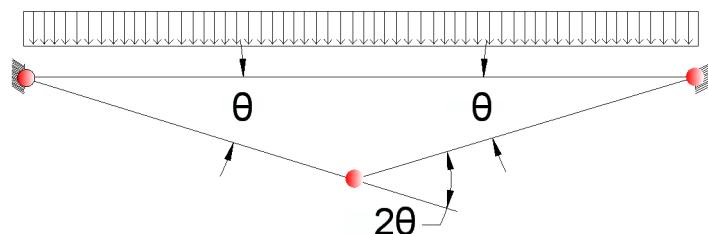


FIGURE 4.46 – Analyse plastique d'une poutre hyperstatique.

Les travaux internes et externes s'écrivent comme suit :

$$\tau_i = 2\theta \cdot M_{pl} + 2\theta \cdot M_{pl} = 4\theta \cdot M_{pl}$$

$$\tau_e = \lambda_{lim} \cdot q \cdot A_{\Delta} = \lambda_{lim} \cdot q \cdot \frac{\frac{L \cdot \theta}{2} \cdot L}{2} = \lambda_{lim} \cdot q \cdot \frac{L^2 \cdot \theta}{4}$$

En égalisant les travaux internes et externes, on obtient le multiplicateur de charges limite accessible à savoir :

$$\lambda_{lim} = \frac{M_{pl}}{\frac{q \cdot L^2}{16}} \quad (4.17)$$

Le profilé résiste donc en section si :

$$M_{ed} = \frac{q \cdot L^2}{16} \leq M_{pl,rd} \quad (4.18)$$

Grâce à l'hyperstaticité et si le profilé est de classe 1, on pourra ainsi atteindre une charge 33% supérieure à celle obtenue en négligeant la plasticité. Il est à noter que le critère de flèches reste inchangé que l'analyse soit élastique ou plastique.

De façon analogue à ce qui a été fait au préalable, il est également possible de représenter les limites entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU. Celles-ci sont reprises pour les deux types d'analyse considérés à la FIGURE 4.47.

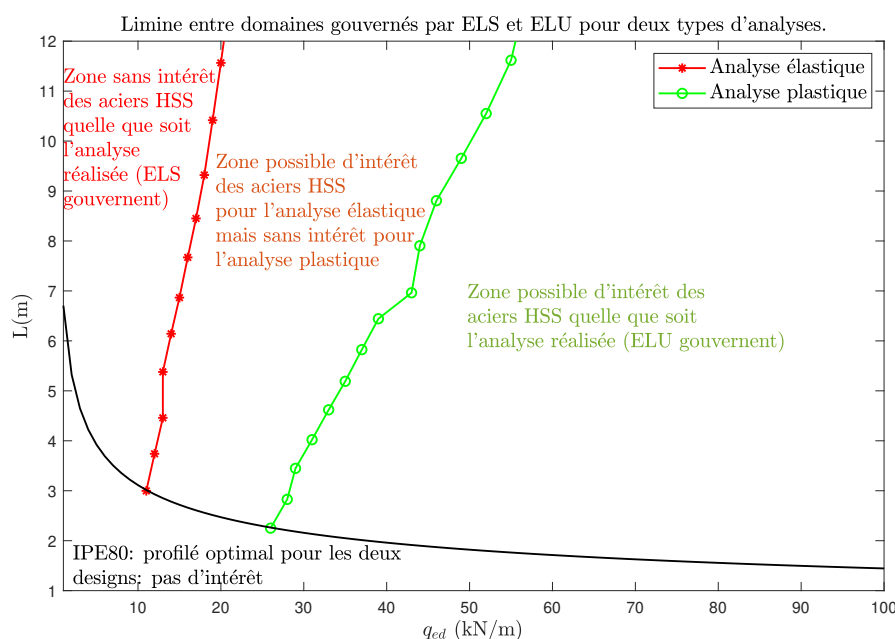


FIGURE 4.47 – Comparaison des limites entre les domaines gouvernés par les ELU et ELS pour une analyse élastique et plastique.

Comme illustré sur la FIGURE 4.47, il faut remarquer qu'étant donné que la prise en compte de la plasticité permet d'augmenter la résistance en section, les états limites de service (ELS) gouvernent d'autant plus le dimensionnement pour ce qui est du dimensionnement sans prise en compte des instabilités. Les résultats seront donc moins intéressants que ceux obtenus préala-

blement.

Il est à noter que seul le cas d'une poutre hyperstatique empêchée de déverser sera étudié pour l'analyse plastique puisque cela n'a pas trop de sens d'envisager le déversement. En effet, lorsqu'on teste une poutre jusqu'à sa résistance plastique, on place généralement un maintien latéral au centre de la poutre afin de l'empêcher de partir en instabilités puisque cette dernière perd aussi bien sa rigidité longitudinale que transversale lors de la formation de la rotule plastique. Dû à la présence du maintien à mi-travée, pour réaliser une analyse plastique prenant en compte le déversement, il n'aurait pu être considéré que la moitié de la longueur susceptible de déverser ce qui serait assez peu significatif. C'est pour cette raison que seul le cas sans prise en compte du déversement a été envisagé pour cette comparaison.

Comparaison des nuances

Les domaines d'intérêt pour les diverses nuances HSS considérées sont repris à la FIGURE 4.48.

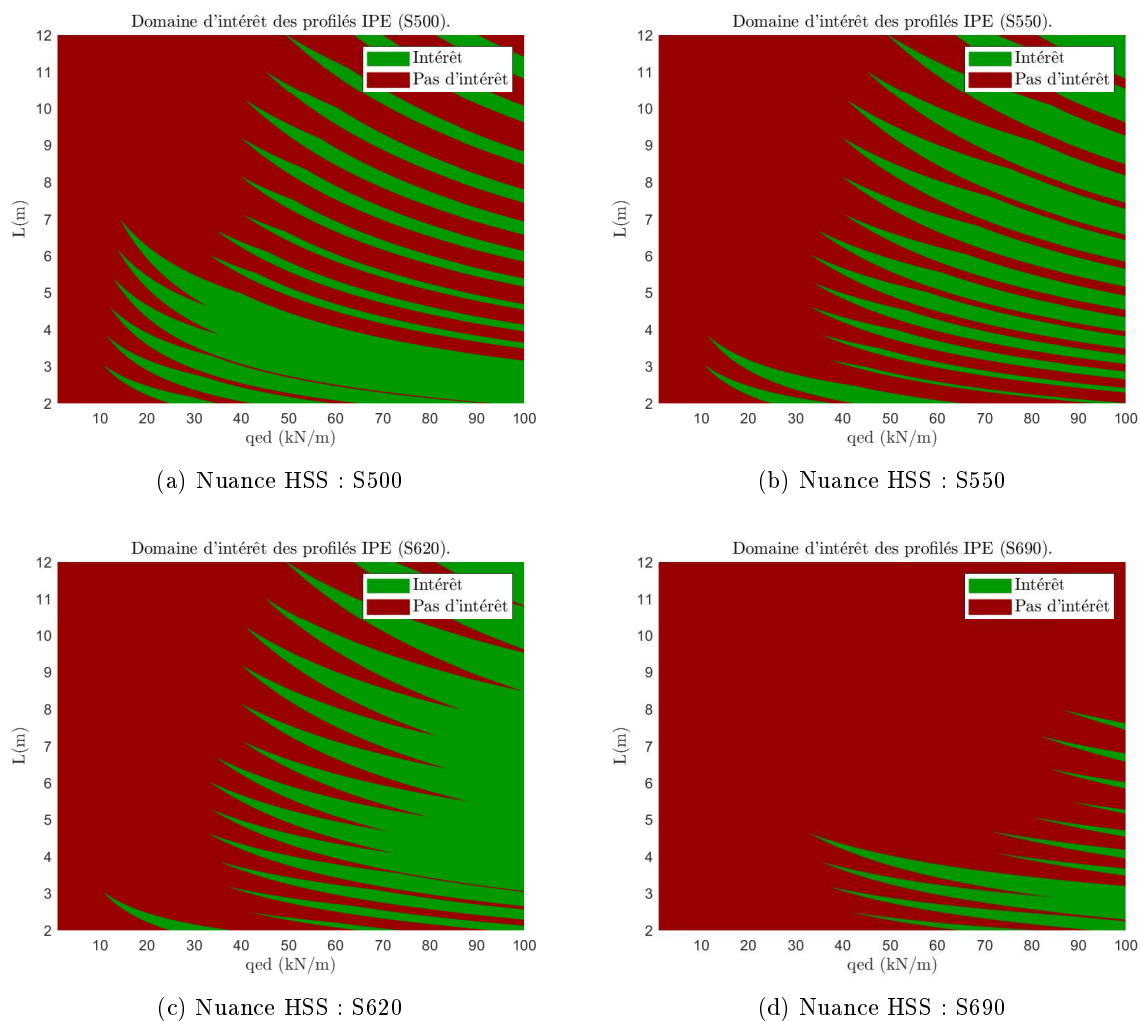


FIGURE 4.48 – Influence du choix de la nuance HSS sur l'intérêt de leur utilisation (cas d'une poutre bi-encastrée sans déversement).

Ces résultats peuvent, à nouveau, s'expliquer en représentant les nombres de profilés d'écart entre le design optimal de la nuance RS et celui de la nuance HSS. Cependant, les raisonnements utilisés afin d'expliquer ces résultats seraient tout à fait analogues à ceux réalisés précédemment dans cette étude. Ils ne seront donc pas plus explicités dans le cadre de cette comparaison.

L'observation majeure pouvant être faite pour cette comparaison est que le passage à une nuance HSS encore plus élevée que la nuance S500 entraîne une augmentation du coût relatif ce qui a un effet néfaste sur l'intérêt de son utilisation. En effet, le fait de passer à une nuance supérieure sous-entend que le coût relatif de cette nuance est supérieur et cela a pour effet de réduire considérablement l'intérêt économique de cette nuance HSS dans le domaine considéré.

Comparaison des critères de flèches

Etant donné l'influence des états limites de service (ELS) sur les résultats, une des comparaisons cruciales à réaliser est donc de comparer les limites de flèches acceptées afin de voir l'influence de celles-ci sur les résultats obtenus précédemment pour une poutre secondaire bi-encastree empêchée de déverser.

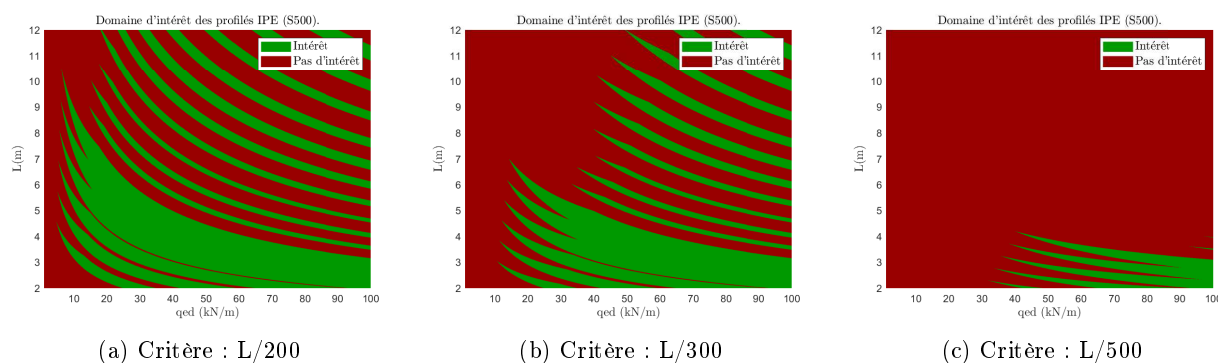


FIGURE 4.49 – Influence du critère de flèches sur l'intérêt des aciers HSS pour une poutre secondaire bi-encastree empêchée de déverser.

Une observation attendue est remarquée à savoir que lorsque le critère de flèches (ELS) devient plus strict, il n'y a quasiment plus de zones d'intérêt. Il va donc de soi qu'au vu de toutes les observations réalisées au travers de ce chapitre le critère de flèches L/500 réduirait considérablement l'intérêt si il était imposé.

Il est possible d'établir des courbes limites à gauche desquelles les aciers HSS ne présentent aucun intérêt puisque ce sont les ELS qui gouvernent et à droite desquelles les aciers HSS ont un possible intérêt puisque ce sont les ELU qui gouvernent le dimensionnement. Les limites entre ces deux domaines pour les différents critères considérés sont repris à la FIGURE 4.50 suivante.

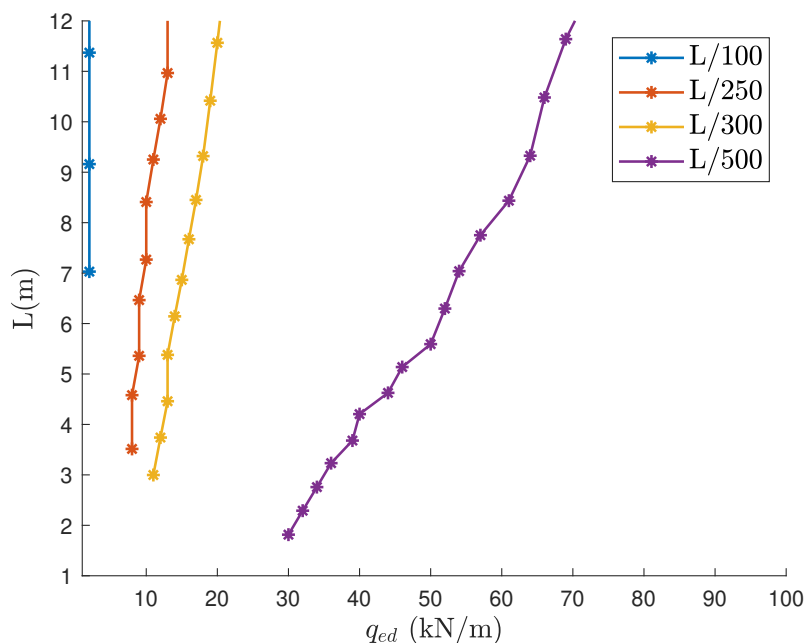


FIGURE 4.50 – Limites des domaines dans lesquels les ELU gouvernent et ceux où les ELS gouvernent pour une poutre bi-encastree sans déversement et différents critères de flèches.

La FIGURE 4.50 illustre bien, à nouveau, le fait que plus le critère de flèches est strict (L/500 par exemple) plus le domaine d'intérêt potentiel de la nuance HSS (domaine gouverné par les ELU) est restreint. A l'inverse, plus le critère de flèches est souple (L/100 par exemple) plus l'intérêt potentiel des aciers HSS croît. L'étude de l'utilisation d'un éventuel cintrage de la poutre (contre-flèche initiale) a donc tout son sens puisque cela permettrait de réduire les flèches considérablement. Malheureusement, le cintrage d'une poutre a un coût, son intérêt sera donc peut-être limité. Cela fera l'objet d'une étude dans le chapitre relatif à l'étude économique.

Comparaison de diverses rigidités d'assemblages

Etant donné les différences importantes qu'il existe entre les résultats pour une poutre secondaire empêchée de déverser isostatique et hyperstatique. Ces deux cas correspondant aux cas extrêmes de rigidité d'assemblages (isostatique=rigidité nulle aux assemblages tandis que le cas hyperstatique = rigidité infinie aux assemblages), il y a lieu d'étudier des rigidités d'assemblages intermédiaires afin de justifier de leur intérêt ou non.

Pour ce faire, une méthode est de déterminer les flèches correspondantes aux divers moments d'encastements fixés. Celles-ci se calculent comme suit :

$$f_{max} = \frac{5 \cdot q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} - 2 \cdot f_{\text{Moment encastement}}$$

or, la raideur de l'assemblage entraîne la reprise d'un effort de moment à l'appui et une réduction de la flèche à mi-travée par conséquent. La flèche engendrée par un moment d'appuis est donnée par :



$$f_{max} = \frac{M \cdot L^2}{16EI}$$

FIGURE 4.51 – Formule de la flèche maximale engendrée par un moment d'appuis.

La formule liant le moment d'appui à la flèche de la poutre s'écrit donc :

$$f_{max} = \frac{5 \cdot q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} - 2 \cdot \frac{M \cdot L^2}{16 \cdot E \cdot I} \quad (4.19)$$

Il est à noter que le moment à mi travée est donné par :

$$M_{\text{mi-travée}} = \frac{q_{ed} \cdot L^2}{8} - M_{\text{appui}} \quad (4.20)$$

La TABLE 4.2 suivante reprend les différents cas qui vont être considérés afin d'étudier l'influence de la rigidité de l'assemblage sur les résultats.

Cas	Critère de flèches	Moment à mi-travée	Moments aux assemblages/appuis	Moment max
1	$\frac{5 \cdot q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{8}$	0	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{8}$
2	$\frac{4 \cdot q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$	$\frac{5 \cdot q_{ed} \cdot L^2}{48}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{48}$	$\frac{5 \cdot q_{ed} \cdot L^2}{48}$
3	$\frac{3 \cdot q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{12}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{24}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{12}$
4	$\frac{2 \cdot q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{16}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{16}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{16}$
5	$\frac{1 \cdot q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{24}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{12}$	$\frac{q_{ed} \cdot L^2}{12}$

TABLE 4.2 – Différents cas de rigidité d'assemblage étudiés dans le cadre de cette comparaison

De façon analogue à ce qui avait été fait dans les sections relatives aux résultats pour les poutres secondaires bi-appuyées et bi-encastrées, il est possible de déterminer une courbe délimitant le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU en égalisant les longueurs limites. Les longueurs limites aux ELU et aux ELS sont les suivantes.

La formule de flèches est sous la forme :

$$f = \frac{A \cdot q_{ek} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \leq \frac{L}{300}$$

A étant le coefficient de la formule de flèches dépendant du cas de rigidité d'assemblages considéré. La longueur limite aux ELS s'écrit donc :

$$L_{lim,ELS} = \sqrt[3]{\frac{1.4 \cdot 384 \cdot E \cdot I}{300 \cdot q_{ed} \cdot A}} \quad (4.21)$$

En ce qui concerne les ELU, le dimensionnement est gouverné par la relation générale suivante :

$$M_{ed} = \frac{B \cdot q_{ed} \cdot L^2}{48} \leq M_{pl,rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

B étant un coefficient du moment de calcul dépendant du cas de rigidité d'assemblages considéré et γ_{M0} une coefficient partiel de sécurité pris égal à l'unité. La longueur limite aux ELU s'écrit donc :

$$L_{lim,ELU} = \sqrt{\frac{48 \cdot W_{pl} \cdot f_y}{B \cdot q_{ed}}} \quad (4.22)$$

En égalisant les deux longueurs limites on obtient finalement :

$$L_{lim,ELS} = L_{lim,ELU}$$

$$\sqrt[3]{\frac{376320 \cdot I}{A \cdot q_{ed}}} = \sqrt{\frac{48 \cdot f_y \cdot W_{pl}}{B \cdot q_{ed}}}$$

Pour la nuance RS S355, on a :

$$q_{ed}^{1/6} = \frac{\sqrt{48 \cdot 355}}{\sqrt[3]{376320}} \cdot \frac{A^{1/3}}{B^{1/2}} \cdot \frac{W_{pl}^{1/2}}{I^{1/3}} = 1.808 \cdot \frac{A^{1/3}}{B^{1/2}} \cdot \frac{W_{pl}^{1/2}}{I^{1/3}}$$

En élevant à la puissance 6 les deux membres de l'égalité, on a donc la valeur de la charge d'intersection en fonction du profilé considéré :

$$q_{ed} = 34.937 \cdot \frac{A^2}{B^3} \cdot \frac{W_{pl}^3}{I^2} \quad (4.23)$$

En substituant la relation 4.23 dans soit l'équation 4.21 soit l'équation 4.22, on obtient les coordonnées des points d'intersection entre les deux domaines à savoir :

$$(q_{ed}, L) = \left(34.937 \cdot \frac{A^2}{B^3} \cdot \frac{W_{pl}^3}{I^2}, 22.0845 \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{I}{W_{pl}} \right) \quad (4.24)$$

En considérant les différents profilés IPE du catalogue et connaissant l'équation des coordonnées ci-dessus pour les différentes rigidités d'assemblage, on peut donc tracer cette limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU.

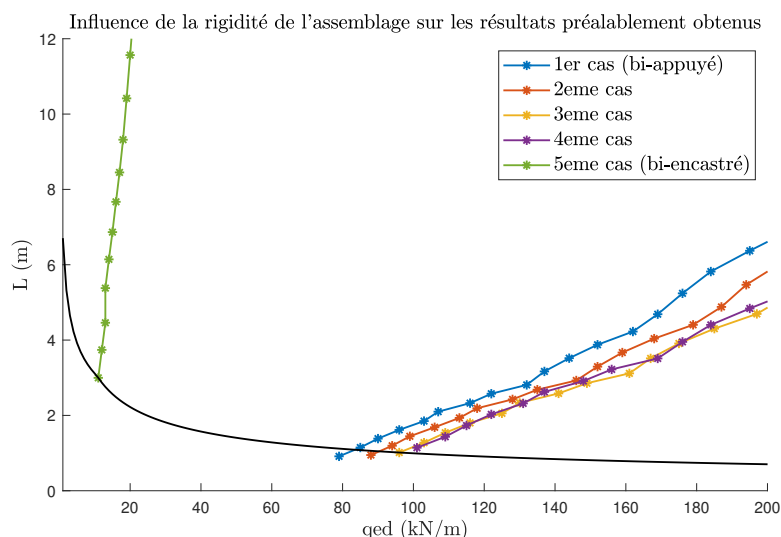


FIGURE 4.52 – Limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU pour une poutre secondaire bi-encastrée empêchée de déverser et pour différentes rigidités d'assemblage.

En conclusion de cette dernière comparaison, seul le cas d'une poutre secondaire bi-encastrée présente la zone la plus conséquente gouvernée par les ELU. Il n'y a donc que ce cas qui semble avoir les zones les plus marquées d'intérêt. La définition de la formule de flèche a donc un grand impact sur l'intérêt économique de la nuance HSS. Il semblerait qu'une petite perte de rigidité entraîne des déformées plus grandes. Les ELS gouvernent donc d'autant plus ce qui a un effet néfaste sur l'intérêt des nuances HSS comme expliqué précédemment.

Comparaison des gammes de profils considérées

Dans les sections précédentes, seule la gamme de profils IPE a été considérée. L'objectif de cette comparaison est de voir l'influence d'un changement de gamme de profils sur les résultats. Les gammes de profils HEA et HEB seront considérées dans le cadre de cette comparaison. Les résultats pour une poutre secondaire bi-encastrée empêchée de déverser sont repris à la FIGURE 4.53 suivante.

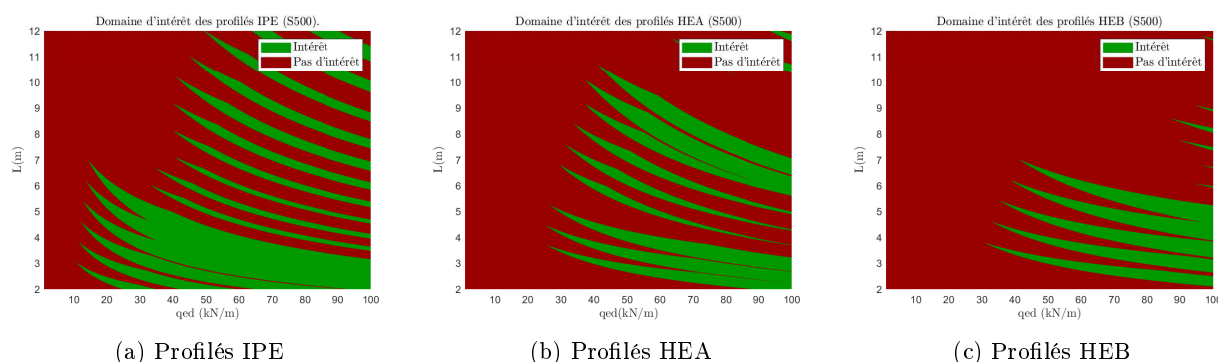


FIGURE 4.53 – Influence du type de profils laminés choisis sur les résultats pour une poutre bi-encastrée empêchée de déverser.

La FIGURE 4.53 illustre le fait que les profilés HE en acier HSS ont moins de domaines d'intérêt que les profilés IPE en acier HSS. Cela peut s'expliquer par la formule (4.16). En effet, les profilés IPE ont la particularité d'avoir une inertie selon l'axe fort plus grande que celle des profilés HE. La limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU se situe donc pour des charges plus faibles avec les profilés IPE que pour les profilés HE. Le domaine gouverné par les ELU est donc plus grand pour le cas des profilés IPE et donc la zone possible d'intérêt de la nuance HSS est plus grande également.

Il est utile de préciser que la formule (4.16) n'est pas totalement valable pour les profilés HE puisque ces derniers sont parfois de classe 3 (avec l'acier RS). Considérer le module de flexion plastique n'a donc pas de sens. Les limites entre le domaine gouverné par les ELU et celui gouverné par les ELS ont été établies en prenant en compte les classes de sections. Celles-ci sont reprises à la FIGURE 4.54.

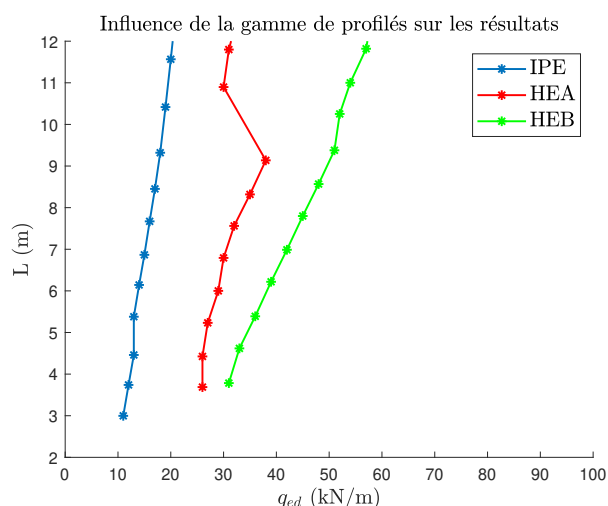


FIGURE 4.54 – Limites entre le domaine gouverné par les ELS (à gauche) et celui gouverné par les ELU (à droite) pour différentes gammes de profilés.

La FIGURE 4.54 illustre bien que le fait de passer d'une gamme IPE à une gamme HE a pour effet de diminuer l'inertie selon y de la poutre. Les déformations de la poutre vont donc être plus importantes puisque les flèches sont dépendantes de l'inertie du profilé. Les états limites de services (ELS) vont, de ce fait, être d'autant plus prédominants sur le dimensionnement vis-à-vis des états limites ultimes (ELU). Cela a pour effet de décaler les limites pour les gammes HE vers la droite sur la FIGURE 4.54 et ainsi réduire l'intérêt porté à l'utilisation d'une nuance HSS.

4.3.5 Résultats pour les poutres primaires bi-appuyées (isostatiques)

Jusqu'à présent, dans ce chapitre relatif aux éléments en flexion pure, seules les poutres secondaires soumises à un chargement uniforme ont été considérées. Cette section a pour but d'envisager le cas des poutres primaires indépendamment étant donné que le chargement est de type ponctuel et non plus réparti. L'analyse élastique de ce type de poutres est repris à la FIGURE 4.55.

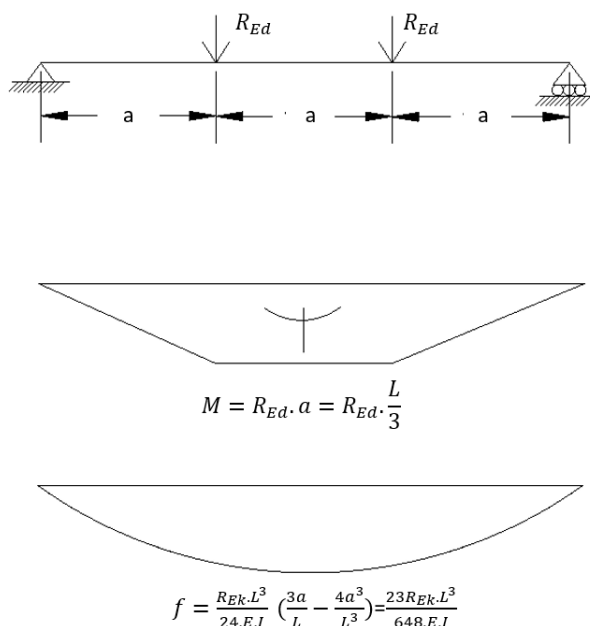


FIGURE 4.55 – Valeurs références de l'analyse élastique d'une poutre primaire.

Il est à noter que le poids propre sera également pris en compte en sommant la composante du moment relative au poids propre, le moment se calcule comme suit :

$$M_{ed} = \frac{R_{ed} \cdot L}{3} + \frac{q_{pp} \cdot L^2}{8}$$

où q_{pp} est le poids propre du profilé utilisé. Ce dernier sera pondéré par un coefficient de sécurité de 1.35 pour les ELU tandis qu'il sera non-pondéré lors de l'évaluation des flèches (ELS).

Il en va de même pour le calcul de flèches (ELS). La formule pour la calcul de flèches est la suivante :

$$f_{max} = \frac{23 \cdot R_{ek} \cdot L^3}{648 \cdot E \cdot I} + \frac{5 \cdot q_{pp} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Ces additions peuvent être réalisées dans les deux cas par le principe de superposition (domaine élastique).

Sans déversement

Les résultats montrant les domaines d'intérêt d'un acier HSS S500 pour le cas de la poutre primaire sans prise en compte des instabilités sont repris à la FIGURE 4.56.

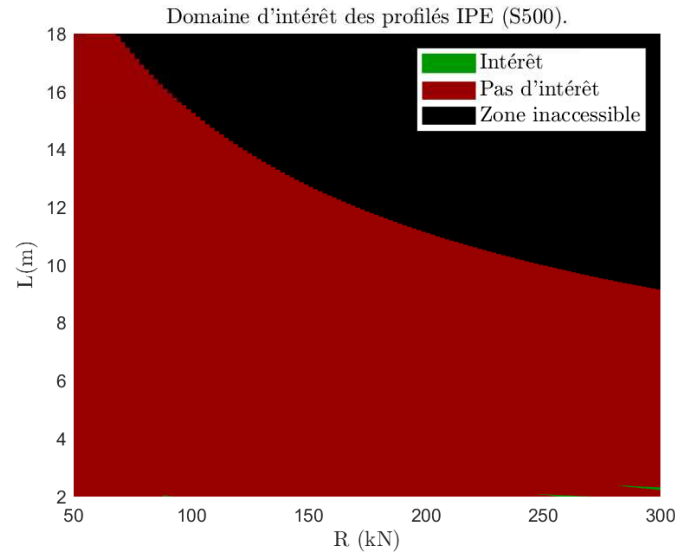


FIGURE 4.56 – Résultats pour une poutre primaire bi-appuyée en acier HSS S500 sans prise en compte des instabilités.

Afin de connaître l'influence du critère de flèches sur les résultats, il convient d'établir de façon analogue à ce qui a été fait précédemment la limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU.

La longueur limite aux ELS (en négligeant la composante relative au poids propre) est la suivante :

$$L_{lim_{ELS}} = \sqrt{\frac{1.4 \cdot 648 \cdot E \cdot I}{300 \cdot 23 \cdot R}} \quad (4.25)$$

La longueur limite aux ELU (en négligeant également la composante relative au poids propre) :

$$L_{lim_{ELU}} = \frac{3 \cdot W_{pl} \cdot f_y}{R} \quad (4.26)$$

Par manipulations mathématiques analogues à celles réalisées précédemment et en considérant la nuance RS S355, on obtient la relation suivante :

$$R = 38.917 \cdot \frac{W_{pl}^2}{I}$$

On peut ainsi connaître les coordonnées des points d'intersection entre les deux domaines. Ceux-ci sont les suivants :

$$(R, L) = \left(38.917 \cdot \frac{W_{pl}^2}{I}, 27.36 \cdot \frac{I}{W_{pl}} \right) \quad (4.27)$$

La FIGURE 4.57 reprend cette courbe limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU ainsi que le nombre de profils d'écart entre les deux designs comparés.

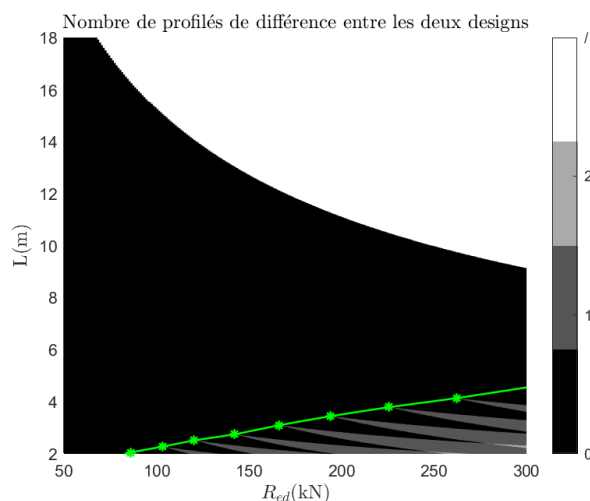


FIGURE 4.57 – Nombre de profils d'écart et limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU pour une poutre primaire bi-appuyée empêchée de déverser.

On remarque que peu importe le coût relatif de la nuance HSS considéré, la quasi totalité du domaine sera toujours gouvernée par les ELS et ne présentera donc pas d'intérêt de la nuance HSS.

Avec déversement

En ce qui concerne le cas prenant en compte les instabilités, les résultats pour la gamme de profils IPE et la nuance d'acier HSS S500 sont repris à la FIGURE 4.58.

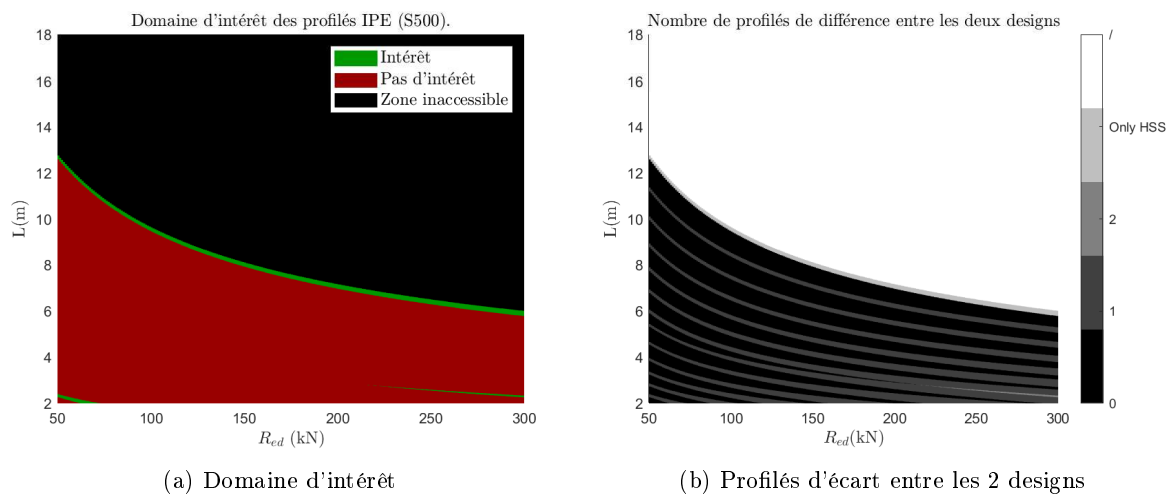


FIGURE 4.58 – Résultats pour une poutre primaire en acier S500 avec prise en compte des instabilités.

Il est important de préciser que la longueur de déversement considérée est égale à la longueur totale de l'élément. Cependant, étant donné la présence des poutres secondaires, la raideur de celles-ci sur la FIGURE 3.3 devrait empêcher la poutre primaire de déverser sur l'entièreté de sa longueur. Si il avait été considéré ces raideurs suffisantes que pour empêcher le déversement, la

longueur de déversement aurait été prise égale au tiers de la longueur et les résultats auraient été fort similaires à ceux obtenus dans le cas "sans déversement".

4.3.6 Résultats pour les poutres primaires bi-encastées (hypertstatiques)

Etant donné les résultats assez probants qu'avait donné le cas des poutres secondaires bi-encastées, il convient d'étudier cette condition d'appuis sur les poutres primaires également. L'analyse élastique de ce type de poutres est reprise à la FIGURE 4.59.

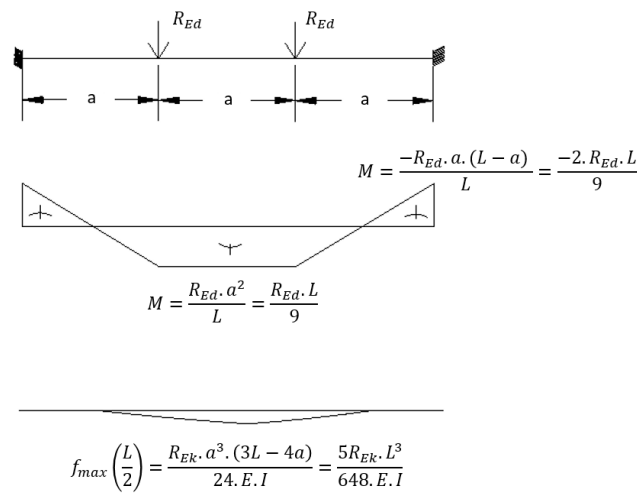


FIGURE 4.59 – Analyse élastique de ce type de poutres/chargement.

De façon analogue à la section précédente, le poids propre sera pris en compte par le principe de superposition étant donné que l'analyse est élastique. Les deux relations suivantes seront donc utilisées afin de prendre en compte le poids propre dans les calculs.

$$M_{ed} = \frac{q_{pp} \cdot L^2}{12} + \frac{2RL}{9}$$

et ;

$$f_{max}(L/2) = \frac{R_{ek} \cdot a^2 \cdot (3L - 4a)}{24 \cdot E \cdot I} + \frac{q_{pp} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot R_{ek} \cdot L^2}{648 \cdot E \cdot I} + \frac{q_{pp} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Sans déversement

Les résultats pour le cas sans prise en compte des instabilités (déversement) sont repris à la FIGURE 4.60.

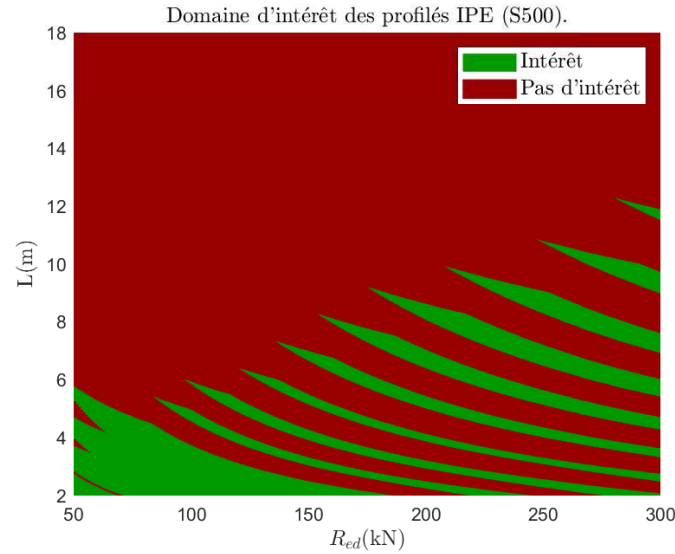


FIGURE 4.60 – Résultats pour une poutre primaire bi-encastée empêchée de déverser.

Comme attendu suite à l'étude des poutres secondaires, les résultats sont bien plus probants lorsque les poutres primaires sont bi-encastées que lorsqu'elles sont bi-appuyées. De façon analogue à ce qui avait été fait tout au long de cette étude d'éléments en flexion pure, la limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU peut être établie par développements analytiques simples. Pour commencer, la longueur limite aux ELS (en négligeant la composante relative au poids propre) est la suivante :

$$L_{lim_{ELS}} = \sqrt{\frac{1.4 \cdot 648 \cdot E \cdot I}{300 \cdot 5 \cdot R}} \quad (4.28)$$

La longueur limite aux ELU (en négligeant également la composante relative au poids propre), quant-à-elle, s'écrit :

$$L_{lim_{ELU}} = \frac{9 \cdot W_{pl} \cdot f_y}{2 \cdot R} \quad (4.29)$$

Par manipulations mathématiques analogues à celles réalisées précédemment et en considérant la nuance RS S355, on obtient la relation suivante :

$$R = 19.035 \cdot \frac{W_{pl}^2}{I}$$

On peut ainsi connaître les coordonnées des points d'intersection entre les deux domaines. Ceux-ci sont les suivants :

$$(R, L) = \left(19.035 \cdot \frac{W_{pl}^2}{I}, 83.92 \cdot \frac{I}{W_{pl}} \right) \quad (4.30)$$

La FIGURE 4.61 reprend cette courbe limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU ainsi que le nombre de profils d'écart entre les deux designs comparés.

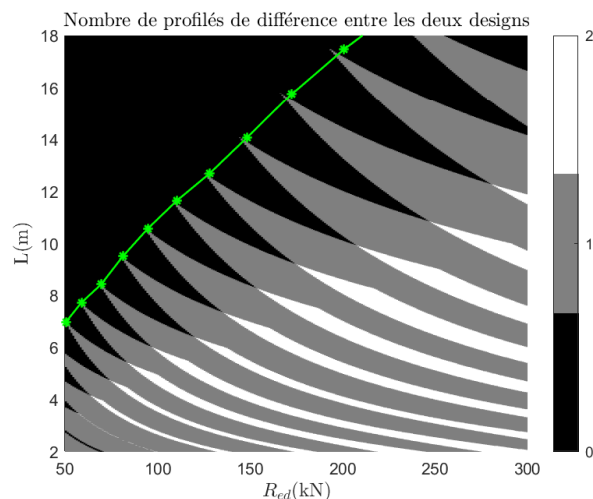


FIGURE 4.61 – Limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU pour une poutre primaire bi-encastée empêchée de déverser.

Le domaine gouverné par les ELU est donc ici beaucoup plus important et conduit à des zones possibles d'intérêt de la nuance HSS plus larges. L'intérêt ou non des différentes franges sur la FIGURE 4.60 s'explique par un raisonnement semblable à ceux réalisés précédemment grâce aux FIGURES 4.61 et 4.38.

Avec déversement

Les résultats pour le cas d'une poutre IPE avec prise en compte des instabilités et la nuance HSS S500 sont repris à la FIGURE 4.62.

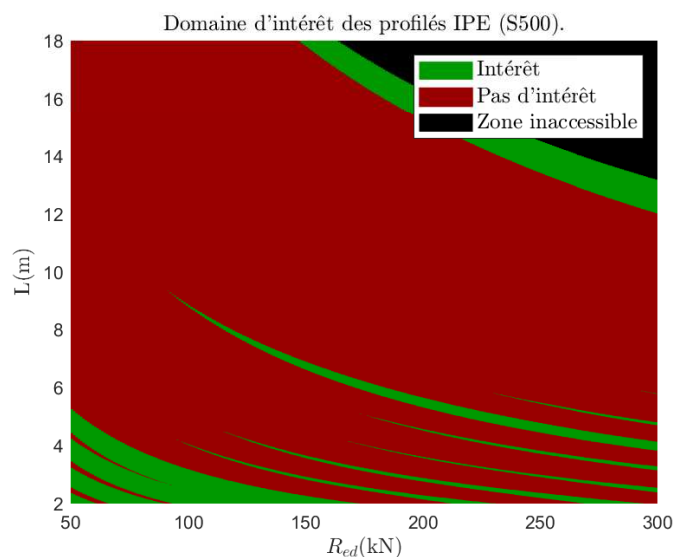


FIGURE 4.62 – Résultats pour une poutre primaire bi-encastée libre de déverser.

De façon analogue aux poutres secondaires, la prise en compte du déversement entraîne une augmentation des zones d'intérêt potentielles. Lorsque le nombre de profils d'écart est tracé (FIGURE 4.63), il y a au minimum un profil d'écart dans la majorité du domaine. Cela sous-

entend qu'en fonction du coût relatif de la nuance HSS considérée les zones d'intérêt pourront être plus ou moins larges. Autrement dit, si le coût relatif de la nuance S500 avait été plus faible, il aurait été possible d'avoir une grande partie du domaine présentant un intérêt économique.

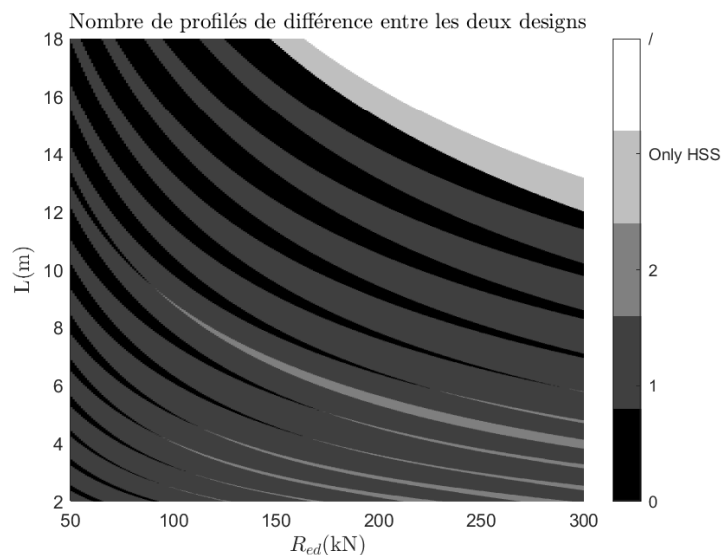


FIGURE 4.63 – Nombre de profils d'écart entre les deux designs pour une poutre primaire bi-encastree libre de déverser.

L'étude de l'influence du coût relatif sur les résultats fera l'objet d'un chapitre ultérieur dans ce travail de fin d'études.

Il est à préciser que les comparaisons pour les poutres primaires ne seront pas explicitées. En effet, les conclusions de l'étude de paramètres réalisées pour les poutres secondaires peuvent tout à fait être faites pour les poutres primaires.

Les diagrammes de rapports de poids entre les deux profils requis sont repris pour différentes combinaisons de paramètres dans l'Annexe C de ce travail.

En affichant l'entièreté des résultats pour diverses combinaisons de paramètres, le cas des poutres primaires HEA bi-encastrees empêchées de déverser est interpellant. En effet, ce dernier fournit des rapports de poids inférieurs à l'unité laissant sous-entendre que la nuance HSS requiert plus de matière que la nuance RS ce qui a peu de sens physique.

Ce cas de figure est observé pour des poutres courtes soumises à des charges ponctuelles élevées ce qui sous-entend que le dimensionnement est gouverné par les efforts tranchants. Les poutres sont très fortement cisailées de telle sorte que la flexion en devient négligeable. De plus, ce cas de figure est observé pour des cas où la section requise pour l'acier RS est de classe 1 ou 2 alors que la section requise pour l'acier HSS est de classe 3. On aura donc d'un côté, une vérification de l'interaction M-V plastique alors que de l'autre le critère de Von Mises devra être vérifié (domaine élastique). Or, l'Eurocode demande de considérer l'aire A_w pour le calcul du $V_{pl,rd}$ tandis qu'il demande de recourir à $h_w \cdot t_w$ pour le calcul de la contrainte de cisaillement dans le critère de Von Mises.

Prenons l'exemple du profilé HEA200 :

$$A_w = 1808 \text{ mm}^2 \text{ \& } A_{el} = h_w \cdot t_w = 1105 \text{ mm}^2$$

Le rapport des aires considérées vaut donc 1.64, dans le calcul de l'interaction plastique (nuance RS) on considère donc 64% de plus de matières pour reprendre l'effort tranchant. Le critère de Von Mises, de par le fait qu'il considère une aire de reprise de l'effort tranchant plus faible, amène à augmenter les sections pour la nuance HSS. C'est donc ce phénomène induit par les formules de l'Eurocode 3 qui conduit aux résultats aberrants en question. En remplaçant le A_{el} par le A_w dans le calcul de la contrainte tangentielle du critère de Von Mises, les résultats aberrants disparaissent ce qui prouve la fiabilité de l'explication apportée.

Le deuxième cas fournissant des rapports de poids inférieurs à l'unité est celui des profilés HEA en S690. Cela s'explique par le fait que trois profilés de la gamme sont de classe 4 pour cette nuance mais pas pour la nuance S355. Dès lors, puisqu'il a été choisi de négliger les profilés de classe 4 en flexion pure, si le design RS donne l'un de ses profilés, le design HSS donnera un profilé plus grand d'où le rapport de poids inférieur à l'unité.

4.3.7 Etablissement d'un critère limite d'utilisation d'un profilé

A la différence des colonnes précédemment considérées, le dimensionnement des éléments de type poutre est gouverné par deux choses :

- Les états limites ultimes (ELU)

$$M_{ed} < M_{b,rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \text{ pour les classes de sections 1 et 2} \quad (4.31)$$

$$M_{ed} < M_{b,rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \text{ pour les classes 3} \quad (4.32)$$

- Les états limites de service (ELS)

$$f < \frac{L}{300} \quad (4.33)$$

Il est à noter que la formule du moment de calcul ainsi que les formules de flèches ont été exprimées à chaque section respective.

A l'instar de ce qui avait été développé pour les éléments en compression seule, le coefficient de pénalisation χ permettant de prendre en compte le déversement dans le calcul du moment résistant peut être exprimé en fonction de l'élancement réduit.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\left(\sqrt{\left(\frac{\alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT}^- - 0.2)}{2} + \frac{\lambda_{LT}^{-2}}{2} + \frac{1}{2} \right)^2 - \lambda_{LT}^{-2} + \frac{\alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT}^- - 0.2)}{2} + \frac{\lambda_{LT}^{-2}}{2} + \frac{1}{2}} \right)} \leq 1$$

Sur base de cette formule et de celle du moment critique, il est possible de connaître la longueur limite d'utilisation $L_{lim_{ELU}}$ d'un profilé pour un chargement donné. La longueur limite

d'un profilé est donc donnée par :

$$L_{lim} = \min(L_{min_{ELU}}, L_{min_{ELS}}) \quad (4.34)$$

Il est ainsi possible de fournir des graphiques représentant les limites d'utilisation des différents profilés du catalogue considéré. Ces derniers sont différents en fonction du type de profilés considéré, de la nuance HSS utilisée, du critère de flèches ou encore des conditions d'appuis. Ces limites d'utilisation ainsi établies à l'aide du logiciel MATLAB vont faire partie intégrante de la première méthode explicitée à la sous-section suivante.

4.3.8 Méthodes d'évaluation de l'intérêt d'une nuance HSS

L'objectif de cette dernière sous-section est de fournir à l'utilisateur/concepteur deux méthodes distinctes afin de déterminer si la nuance HSS considérée a un intérêt économique ou non.

Méthode 1 : méthode déterminant directement les profilés requis

Comme pour les autres types d'éléments étudiés précédemment, cette première méthode consiste à déterminer à l'aide d'une routine implémentée dans MATLAB, les profilés requis pour les deux nuances (RS et HSS) comparées. Les deux profilés requis peuvent être déterminés graphiquement en utilisant les graphiques fournis par la routine ou numériquement en utilisant la routine jusqu'à la fin de son exécution. Connaissant ces deux profilés, l'utilisateur pourra à l'aide du catalogue connaître le rapport de poids entre ceux-ci et en comparant ce rapport de poids au coût relatif de la nuance HSS évaluer l'intérêt économique de l'utilisation de la nuance HSS. A l'instar de ce qui avait été fait au préalable, un exemple va être abordé afin de comprendre la démarche.

La routine une fois lancée, demande les questions suivantes à l'utilisateur :

```

Quelle est la longueur de la poutre considérée (en m)?7
Quel cas voulez-vous étudier?
1: Une poutre secondaire bi-appuyée
2: Une poutre secondaire bi-encastree
3: Une poutre primaire bi-appuyée
4: Une poutre primaire bi-encastree
1
Avec ou sans déversement?
1: Sans déversement
2: Avec déversement
1
Que vaut la charge répartie utile appliquée sur la poutre (en kN/m)?30
Quel est le critère de flèches à respecter (ELS)? L/300
Pour quelle nuance d'acier haute performance voulez-vous étudier l'intérêt? S500
Quelle gamme de profilés voulez-vous étudier?
1: IPE
2: HEA
3: HEB
1|

```

FIGURE 4.64 – Questions/ réponses entre la routine et l'utilisateur.

La routine, sur base des réponses de l'utilisateur, fournit les diagrammes repris à la FIGURE 4.65.

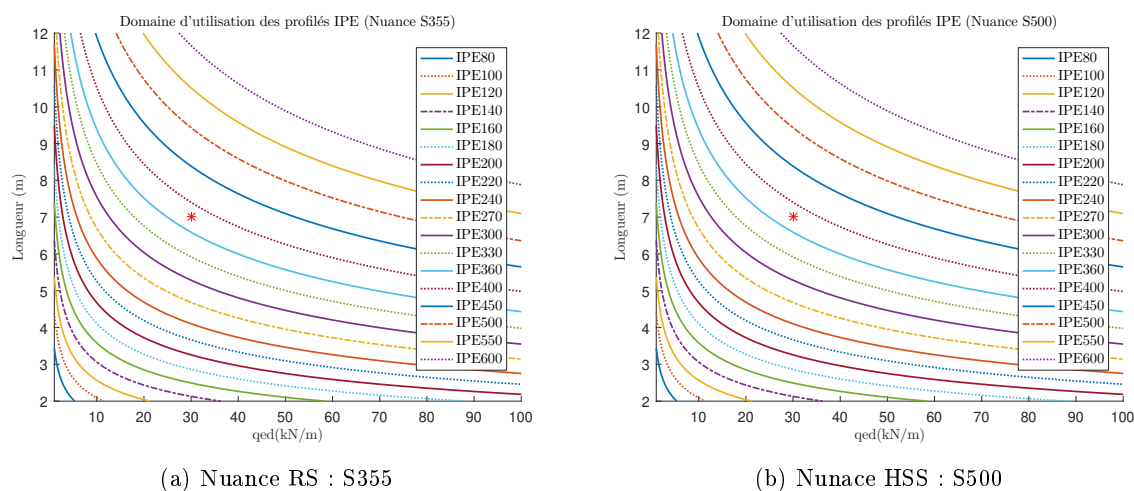


FIGURE 4.65 – Limites d'utilisation des différents profils du catalogue fournies par la routine.

L'utilisateur connaît donc les deux profils requis pour les deux nuances comparées. Cependant, la routine retourne les informations complémentaires suivantes.

```
Le profilé requis avec du S355 est: IPE400
Le profilé requis avec du S500 est: IPE400
Que vaut le coût relatif de la nuance HSS par rapport à la nuance S355? 1.187
Le rapport de poids des deux profilés requis vaut: 1 il n'y a donc pas d'intérêt !
>> |
```

FIGURE 4.66 – Informations quant à l'intérêt fournies par la routine MATLAB.

L'utilisateur de la routine a donc désormais connaissance de l'intérêt ou non de l'utilisation de la nuance HSS qu'il a considérée.

Méthode 2 : méthode donnant directement le rapport de poids entre deux designs

De façon analogue à ce qui avait été fait précédemment pour les autres éléments, la deuxième méthode consiste à donner directement le rapport de poids afin que l'utilisateur puisse le comparer avec son coût relatif et ainsi justifier de l'intérêt ou non de la nuance HSS pour son cas d'étude.

En guise d'exemple, à nouveau, la FIGURE 4.67 reprend les différents rapports de poids du domaine pour des poutres secondaires IPE bi-encastées soumises à un chargement uniforme et dont le critère de flèches est fixé à $L/300$. La nuance HSS considérée est S500.

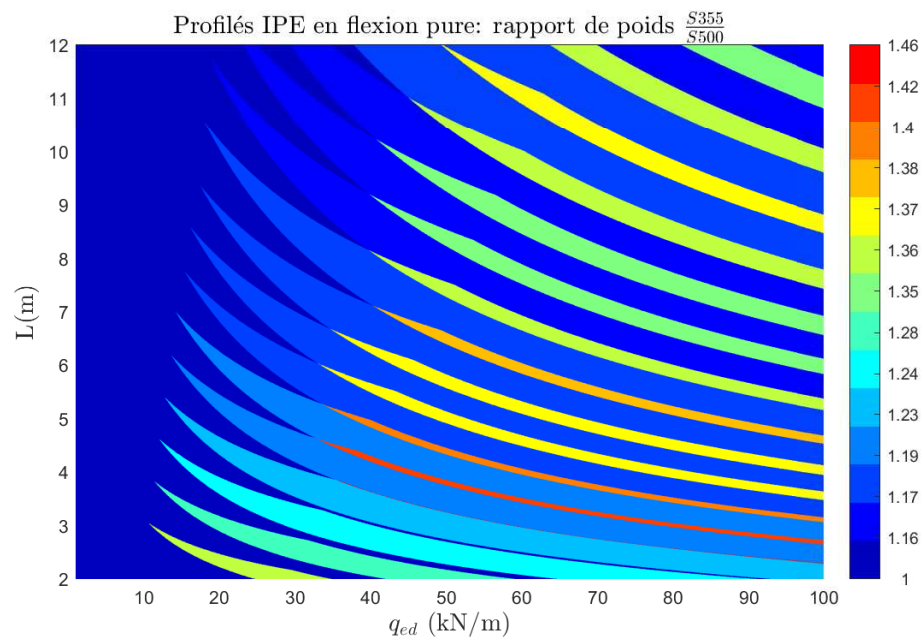


FIGURE 4.67 – Rapport d'aires pour une poutre secondaire IPE bi-encastrée empêchée de déverser.

Les rapports de poids pour les autres combinaisons de paramètres sont repris à l'annexe C.

4.4 Eléments comprimés-fléchis

Dans cette dernière section de l'étude locale, l'étude de l'intérêt économique de l'utilisation de nuances HSS dans le domaine de la construction métallique va se porter sur les éléments comprimés-fléchis. Ce type d'éléments est courant puisque très souvent la plupart des éléments structuraux sont soumis à l'action combinée d'un effort axial et d'un moment de flexion. Effectivement, dans de nombreux cas, on ne peut pas négliger une des sollicitations par rapport à l'autre. Les différentes instabilités considérées jusqu'ici coexistent donc pour ce type d'éléments, l'élément peut flamber et déverser. Cette coexistence entre ces deux types d'efforts amènent des cas inédits. Par exemple, l'existence d'une déformée de flexion primaire a pour effet de procurer à l'effort axial de compression un certain bras de levier qui superpose ses effets à ceux du défaut de rectitude initial. On se retrouve donc avec un comportement non-linéaire (effets du second ordre) dû à ces non-linéarités géométriques.

Les éléments comprimés-fléchis sont donc beaucoup plus difficiles à analyser puisque ces derniers comportent tous les types d'efforts (M , N et V) et toutes les instabilités (flambement, déversement). Ils doivent respecter tous les critères (ELS et ELU) des différents éléments étudiés jusqu'ici.⁶

Afin d'étudier l'intérêt économique des aciers HSS pour ce type d'élément, le cas concret suivant a été considéré (FIGURE 4.68).

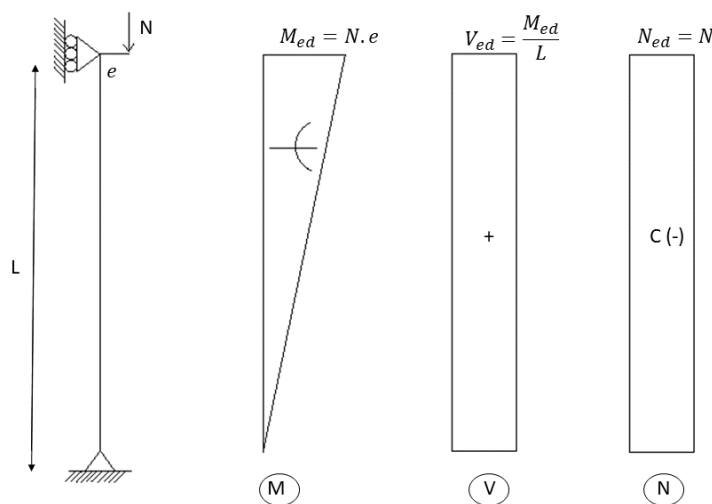


FIGURE 4.68 – Cas étudié pour l'analyse de l'intérêt d'une nuance HSS pour un élément comprimé-fléchi.

6. Description de l'élément inspirée du cours du Professeur Jaspart (Université de Liège) [9]

4.4.1 Simulations numériques

A l'instar de ce qui a été fait précédemment dans l'étude locale, des simulations numériques sur le cas d'étude (FIGURE 4.68) ont été réalisées dans MATLAB afin de justifier de l'intérêt économique ou non d'utiliser un acier HSS dans ce cas. Les codes ont également été vérifiés à la main afin de s'assurer de la fiabilité de ces derniers.

Variables, données

Les différentes variables du code sont les suivantes :

- Les nuances d'aciers HSS considérées à savoir S500, S550, S620 et S690.
- La longueur de la colonne $L \in [1\ 8]m$
- La charge axiale appliquée sur la colonne en son sommet $N_{ed} \in [300\ 3000]kN$
- Les coûts relatifs des différentes nuances d'acier sont : $\frac{c_{S500}}{c_{S355}} = 1.187$, $\frac{c_{S550}}{c_{S355}} = 1.245$, $\frac{c_{S620}}{c_{S355}} = 1.321$ et $\frac{c_{S690}}{c_{S355}} = 1.394$.
- Flambement selon l'axe fort et/ou selon l'axe faible
- La gamme de profilés laminés étudiée HEA, HEB, ...
- L'excentricité de la charge e
- Le critère limite de flèches horizontales est fixé à $L/300$

Organigramme du code

L'organigramme du code est repris à la FIGURE 4.69 suivante.

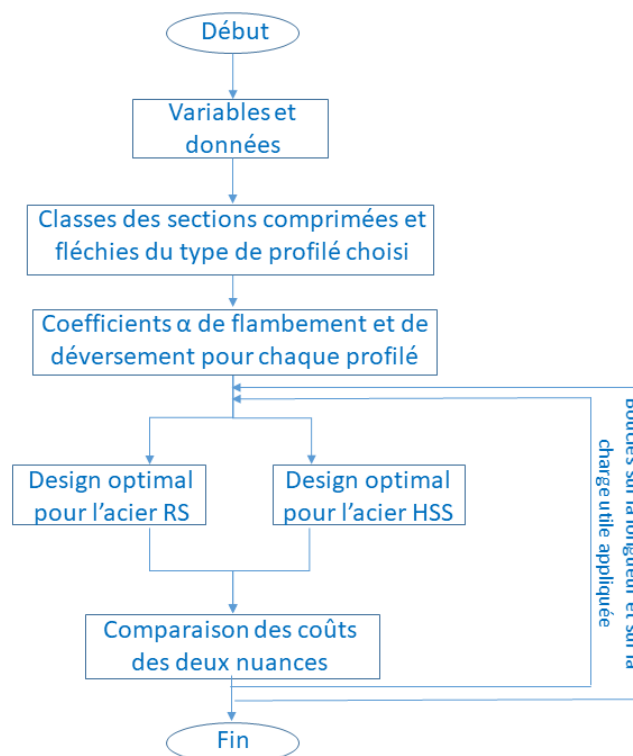


FIGURE 4.69 – Organigramme du code MATLAB pour des éléments comprimés-fléchis.

Le poids propre du profilé considéré est pris en compte dans le calcul de compression. Cependant, il n'est pas pris en compte pour le calcul en flexion puisque l'effort axial induisant un moment dans la colonne s'applique au sommet de celle-ci. Il n'est donc en rien influencé par le poids de la colonne.

Les deux designs pour les deux nuances comparées ont été réalisés en suivant les procédures de l'Eurocode 3 relatif au dimensionnement des structures métalliques [1]. Au même titre que pour la flexion pure, les profilés présentant une section de classes 4 en flexion pure ont été retirés du catalogue puisque ces derniers sont peu utilisés en pratique dû au calcul fastidieux que nécessite ce type de classe. Il en va de même pour les profilés présentant du voilement par cisaillement. A l'inverse, les sections de classe 4 en compression pure ont été prises en compte. A nouveau, dans ce cas d'étude, le domaine est parfois partiellement gouverné par des états limites de service (ELS) entraînant des zones où l'utilisation d'un acier HSS est rendue inintéressante du point de vue économique. Les états limites de service (ELS) seront donc également considérés au même titre que les états limites ultimes pour ce type d'éléments en considérant par contre des charges non-pondérées.

4.4.2 Résultats

Les différents résultats de l'étude de l'intérêt économique d'une nuance HSS pour un élément comprimé-fléchi ont été scindé en trois cas de figure.

- Le flambement ne peut se faire que dans le plan (selon y et non selon z) et par conséquent le déversement (se faisant selon z) est empêché également.
- Le flambement se fait dans l'espace (selon y et selon z) mais le déversement est empêché.
- Le flambement se fait dans l'espace (selon y et selon z) et le déversement est libre.

Il est à noter que tous les résultats seront représentés pour la nuance HSS S500, pour un profilé laminé HEA bi-appuyé, pour un critère limite de flèche fixé à $L/300$ et pour une excentricité de 10cm. L'influence d'un changement de ces paramètres sera étudié au travers de comparaisons réalisées ultérieurement dans l'étude des éléments comprimés fléchis.

Vérification des conditions limites

Avant d'afficher les résultats, il convient de se convaincre de la fiabilité des codes implémentés. Pour ce faire, la vérification consistait à confronter les résultats aux conditions limites avec ceux obtenus en compression pure et ceux obtenus en flexion pure. En effet, lorsque l'excentricité vaut 0, le moment de flexion est nul et on se retrouve dans le cas d'un élément en compression pure. On devrait donc retomber sur les résultats du chapitre qui y est consacré. A l'inverse, lorsque l'excentricité tend vers l'infini et l'effort axial tend vers zéro, le terme relatif à l'effort axial dans les formules utilisées de l'Eurocode 3 devient négligeable par rapport au terme relatif à la flexion. On devrait donc retomber sur les résultats d'un élément en flexion pure. Cependant, le cas d'une colonne soumise à un moment en tête n'a pas été étudié, un code MATLAB pour

une colonne en flexion pure soumise à un moment en tête a donc été implémenté afin de confronter les résultats obtenus pour les deux codes lorsque l'excentricité tend vers l'infini ($e=10\text{m}$) et l'effort axial tend vers zéro. Les confrontations des résultats obtenus pour le cas considérant le flambement dans le plan sans prise en compte du déversement et pour le cas considérant le flambement dans l'espace avec prise en compte du déversement sont repris respectivement aux FIGURES 4.70 et 4.71.

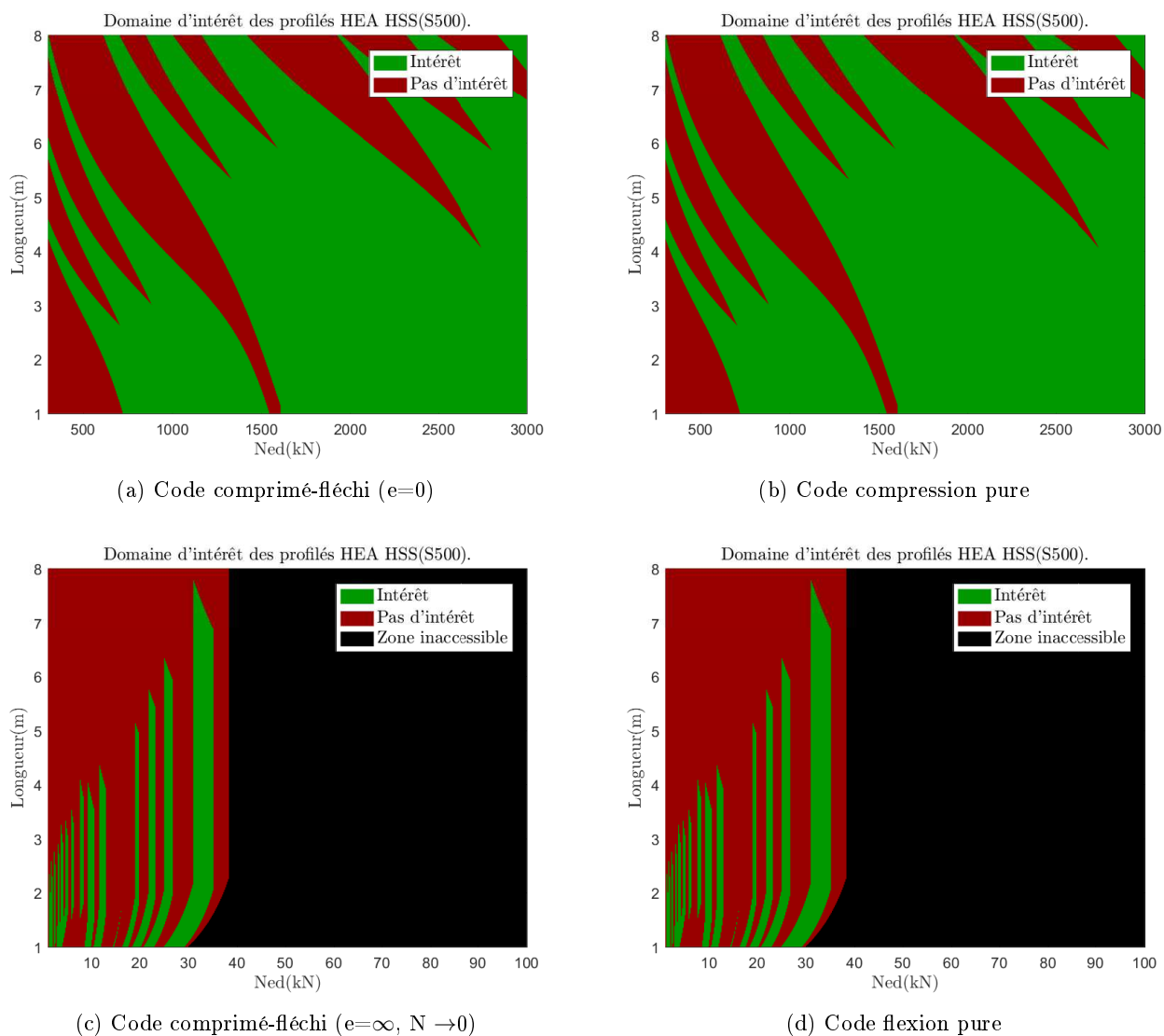


FIGURE 4.70 – Confrontation des résultats aux conditions limites pour le cas du flambement dans le plan sans déversement.

Au vu de la FIGURE 4.70, on remarque que pour le cas considérant le flambement dans le plan sans prise en compte du déversement, les résultats obtenus pour les deux codes sont identiques ce qui prouve la fiabilité des résultats fournis par le code.

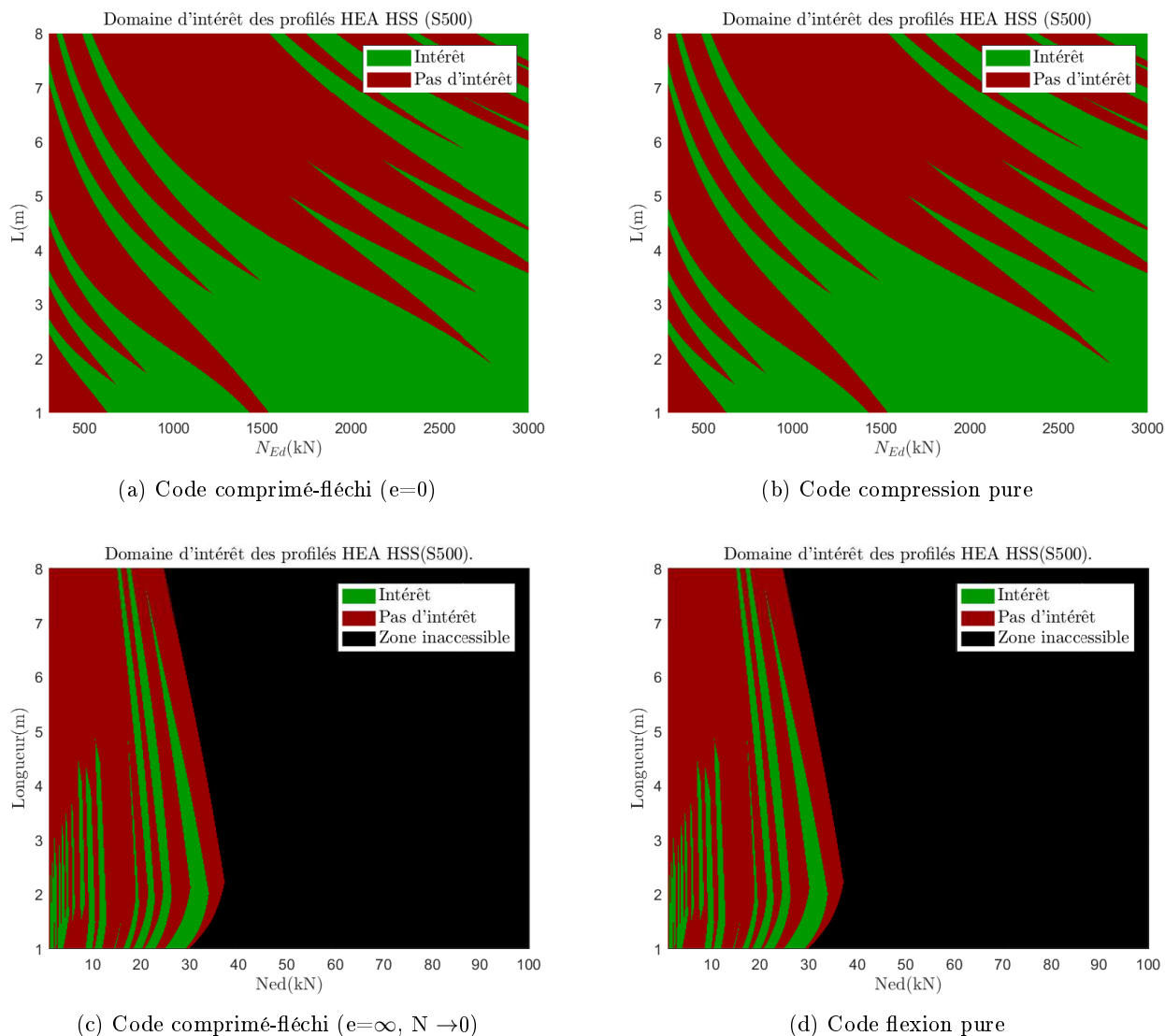
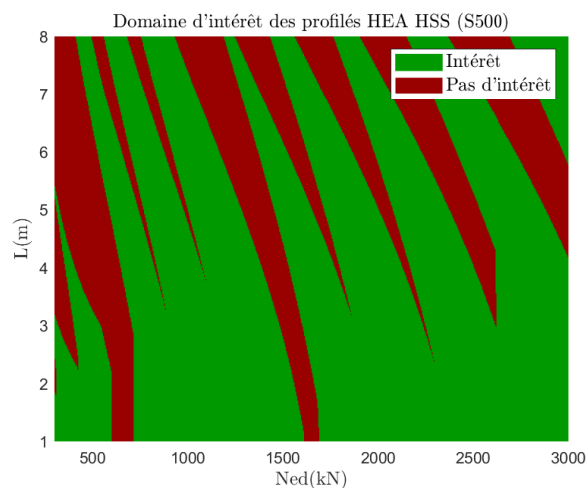
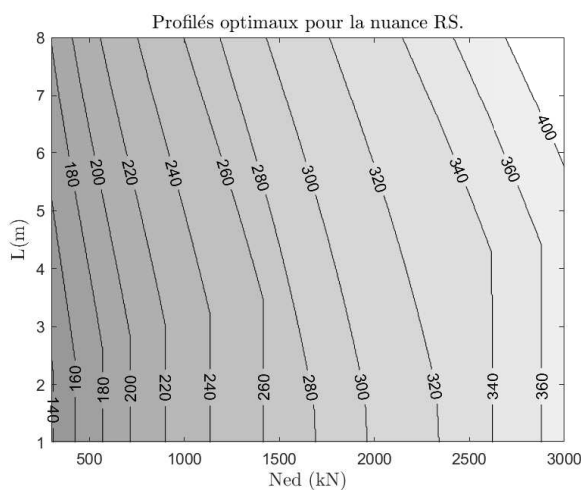


FIGURE 4.71 – Confrontation des résultats aux conditions limites pour le cas du flambement dans l'espace avec déversement.

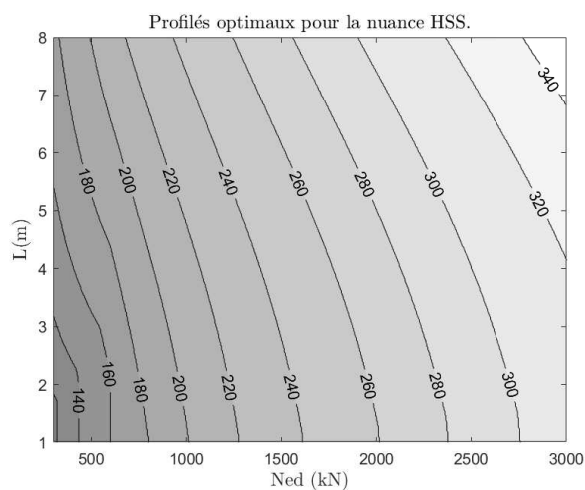
Pour ce deuxième cas considérant le flambement dans l'espace avec prise en compte du déversement, les résultats aux conditions limites sont également identiques pour les deux codes comparés. Etant donné que la fiabilité des codes implémentés est assurée, l'étude de l'intérêt des aciers HSS par rapport à la nuance d'acier RS peut être réalisée.

Flambement dans le plan, sans prise en compte du déversement

Pour ce premier cas de figure, le flambement selon l'axe faible et le déversement sont empêchés. Les résultats obtenus sont fournis à la FIGURE 4.72.

(a) Domaine d'intérêt de la nuance S500, $e=10\text{cm}$ 

(b) Profilé requis pour la nuance RS



(c) Profilé requis pour la nuance HSS

FIGURE 4.72 – Domaine d'intérêt et profils requis pour les deux nuances comparées pour un profilé laminé HEA comprimé fléchi et bi-appuyé, $e=10\text{cm}$ (flambement dans le plan sans déversement).

Comme le montre la FIGURE 4.72, les domaines d'intérêt de la nuance HSS sont relativement marqués en ce qui concerne le cas d'éléments comprimés-fléchis avec flambement d'axe fort et empêchés de déverser. Cependant, graphiquement, il semblerait que les résultats soient plus proches de ceux de la compression pure que de ceux de la flexion pure.

Etant donné qu'une excentricité intermédiaire à celles des conditions limites a été considérée, les résultats sont donc influencés par l'interaction entre le dimensionnement en compression et le dimensionnement en flexion. Il est à noter que la sensibilité des résultats obtenus en fonction de l'excentricité considérée est grande. Cela fera l'objet d'une des comparaisons de paramètres de cette étude.

D'une façon analogue à ce qui avait été fait précédemment, le nombre de profils d'écart entre les profils requis pour les deux nuances comparées peut être représenté (FIGURE 4.73).

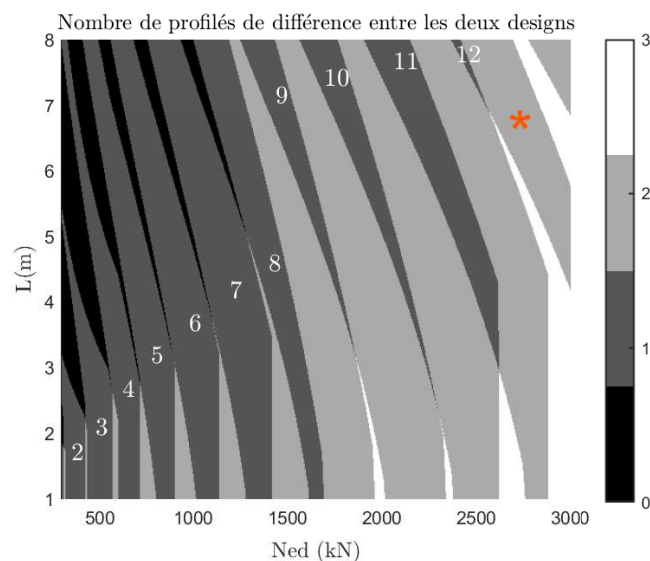


FIGURE 4.73 – Nombre de profils d'écart entre les deux profils requis pour les deux nuances et pour le premier cas d'éléments comprimés-fléchis.

Comme illustré sur la FIGURE 4.73, les zones gouvernées par les ELS présentent zéro profilé d'écart entre les deux profils. C'était un résultat attendu puisque les formules de flèches sont indépendantes de la limite d'élasticité du matériau comme expliqué dans le chapitre précédent relatif aux éléments en flexion pure. Pour ce qui est des zones à un ou deux profils d'écart entre les deux profils requis pour les deux nuances comparées. Cela s'explique, à nouveau, par la condition (3.2). Afin de justifier les résultats obtenus, le rapport de poids entre deux profils successifs ou ayant deux profils d'écart sont représentés à la FIGURE 4.74.

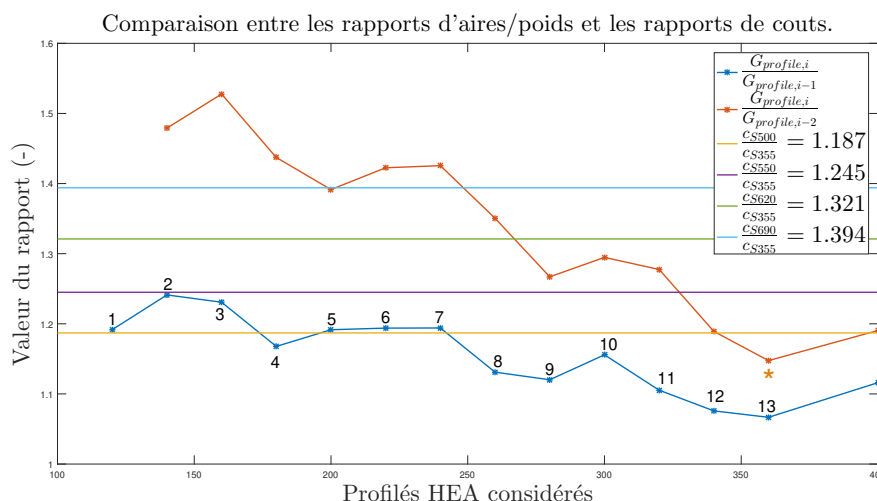


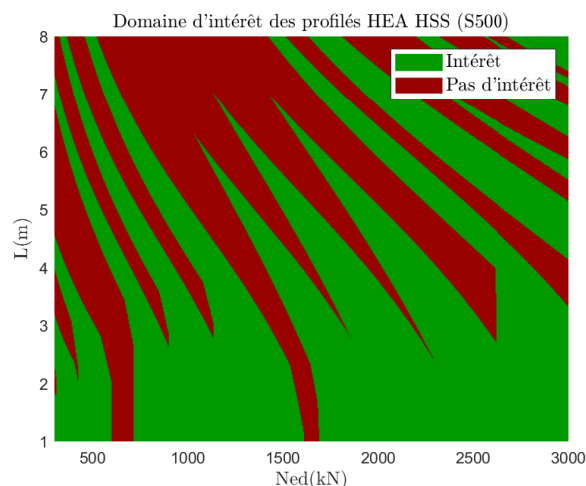
FIGURE 4.74 – Evolution du rapport de poids pour les profils HEA.

En ce qui concerne les zones à un profilé d'écart, seuls le quatrième et les sept derniers rapports de poids de la FIGURE 4.74 sont inférieurs au coût relatif de la nuance S500 par rapport à la nuance S355. Cela se traduit par le fait que les franges correspondantes à ces rapports de poids sont rouges sur la FIGURE 4.72 (a) (la nuance S500 n'a pas d'intérêt) à savoir les franges 4, 8, 9, 10, 11 et 12. En ce qui concerne les zones à deux profils d'écart (courbe d'évolution

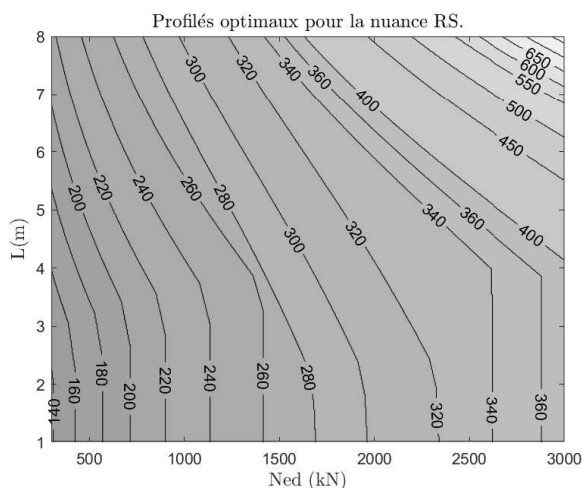
rouge sur la FIGURE 4.74), un seul rapport de poids de la FIGURE 4.74 est inférieur au coût relatif de la nuance S500. Cela se traduit par le fait que seule la frange * de la FIGURE 4.73 soit rouge sur la FIGURE 4.72 (a).

Flambement dans l'espace, sans prise en compte du déversement

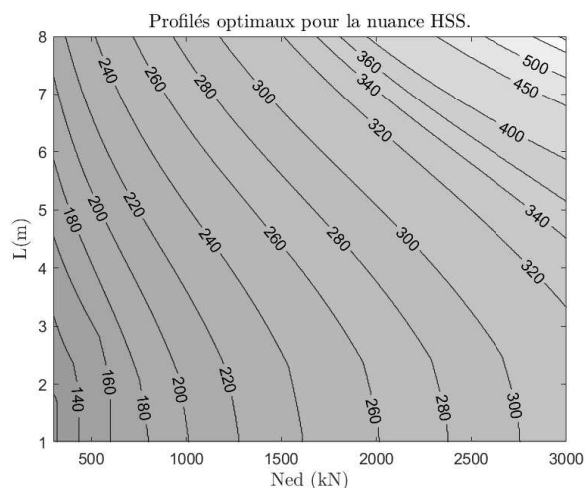
Ce second cas d'étude correspond au cas où l'élément comprimé-fléchi étudié serait libre de flamber selon y et selon z (dans l'espace) mais empêché de déverser. Les résultats obtenus pour ce cas sont repris à la FIGURE 4.75 suivante.



(a) Domaine d'intérêt $e=10\text{cm}$



(b) Profilé requis pour la nuance RS



(c) Profilé requis pour la nuance HSS

FIGURE 4.75 – Domaine d'intérêt et profils requis pour les deux nuances comparées pour un profilé laminé HEA comprimé fléchi et bi-appuyé, $e=10\text{cm}$ (flambement dans l'espace sans déversement).

Les résultats peuvent également être expliqués grâce au nombre de profils d'écart entre les deux designs. Cela est représenté sur la FIGURE 4.76.

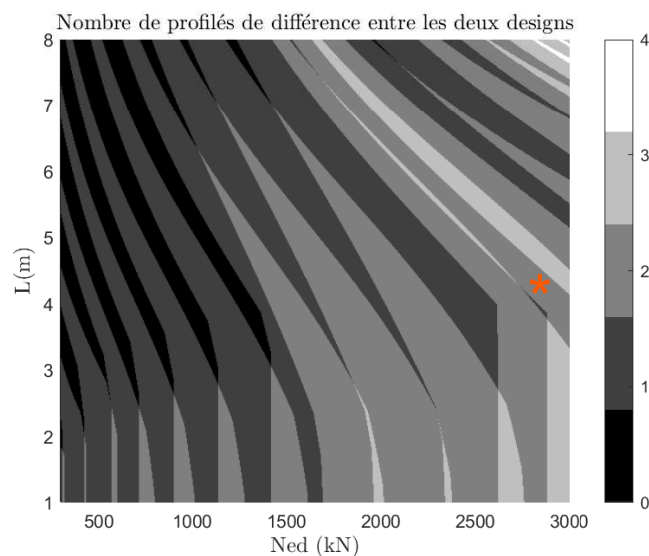


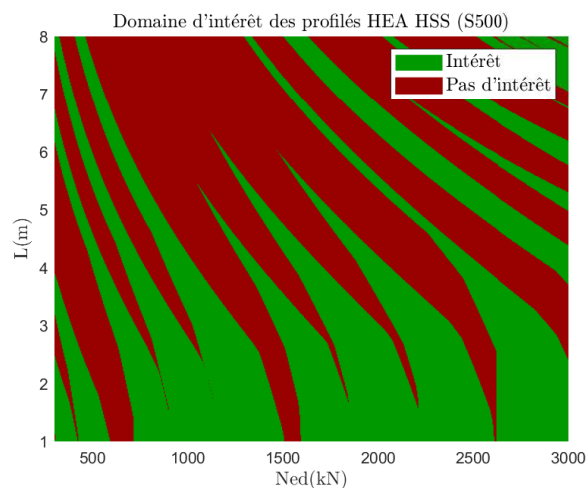
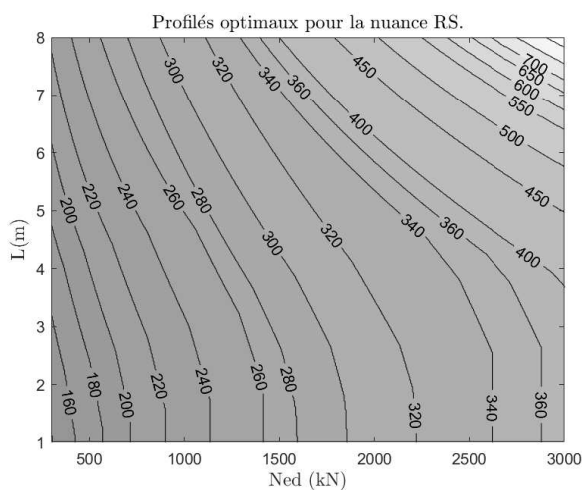
FIGURE 4.76 – Nombre de profils d'écart entre les deux profils requis pour les deux nuances pour le 2ème cas d'éléments comprimés-fléchis.

Les résultats s'expliquent donc entièrement grâce aux FIGURES 4.76 et 4.74. La justification ne sera pas détaillée ici puisque celle-ci est tout à fait analogue à celle réalisée pour le cas précédent.

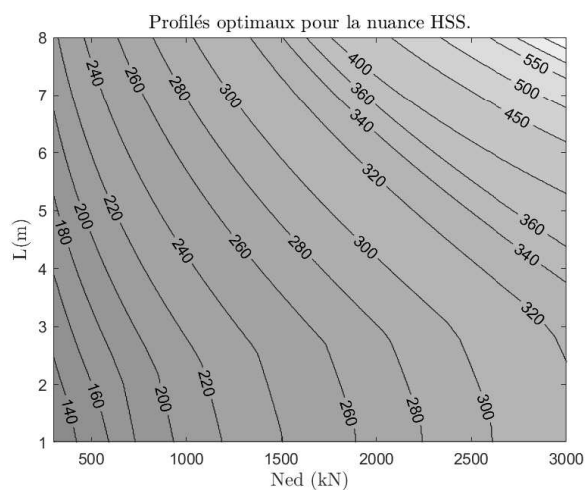
Lors de l'étude des éléments en compression pure, il avait pu être montré que lorsque le flambement selon l'axe faible (z) était libre, les courbes européennes de flambement étaient plus rapprochées et ce cas présentait donc moins d'intérêt que celui où le flambement ne se faisait que selon l'axe fort. Cette affirmation est donc à nouveau illustrée ici (en comparant les FIGURES 4.72 et 4.75).

Flambement dans l'espace, avec prise en compte du déversement

Le dernier cas qui a été considéré est celui d'un élément comprimé-fléchi dont le flambement est libre selon y et selon z (dans l'espace) et le déversement est libre également. Ce dernier cas prend donc en compte tous les types d'instabilités possibles. Les résultats sont repris à la FIGURE 4.77.

(a) Domaine d'intérêt $e=10\text{cm}$ 

(b) Profilé requis pour la nuance RS



(c) Profilé requis pour la nuance HSS

FIGURE 4.77 – Domaine d'intérêt et profils requis pour les deux nuances comparées pour un profilé laminé HEA comprimé fléchi et bi-appuyé, $e=10\text{cm}$ (flambement dans l'espace avec déversement).

Le nombre de profils d'écart ainsi que les domaines gouvernés par les ELU ou par les ELS peuvent une nouvelle fois être représentés (FIGURE 4.78).

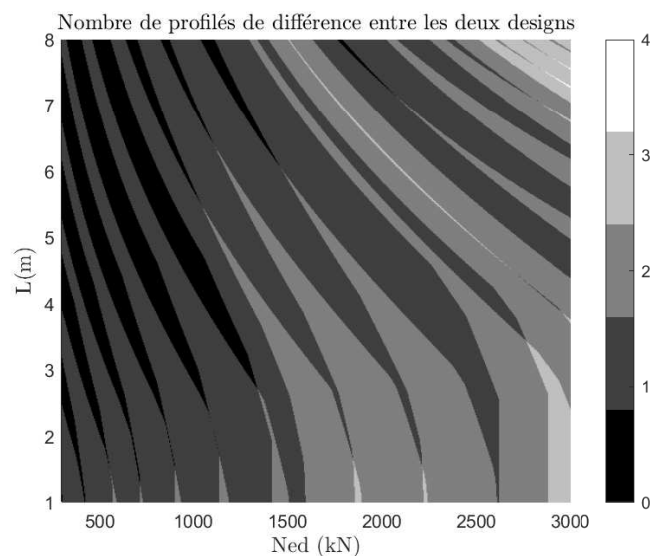


FIGURE 4.78 – Nombre de profils d'écart entre les deux profils requis pour les deux nuances pour le 3ème cas d'éléments comprimés-fléchis.

Les résultats de la FIGURE 4.77 peuvent donc également être expliqués grâce aux FIGURES 4.78 et 4.74 avec un raisonnement semblable à celui qui a été explicité pour le premier cas.

Conclusions

A partir des différents cas d'éléments comprimés-fléchis étudiés dont les résultats ont été représentés et expliqués dans cette sous-section relative aux résultats numériques, il est possible de tirer diverses conclusions.

- La considération du flambement d'axe faible a pour effet de réduire les zones d'intérêt de la nuance HSS considérée comme cela avait déjà été montré au travers de l'étude des éléments en compression pure.
- La considération du déversement a pour effet de réduire encore plus les zones d'intérêt de la nuance HSS.

Ces deux observations peuvent s'expliquer par le fait que l'utilisation d'une nuance HSS a pour effet de réduire le poids de la matière requis pour résister à une même charge. Cependant, le fait de réduire le poids revient à réduire la section de l'élément et a donc pour effet d'augmenter l'élancement de l'élément. Or plus un élément est élancé, plus sa résistance devient indépendante de la limite d'élasticité considérée. Cependant, les différences ne sont pas si marquées puisque plus on considère de phénomènes d'instabilités, plus les ELU gouvernent le dimensionnement et donc moins les ELS gouvernent.

La prise en compte des instabilités réduit donc le domaine gouverné par les ELS mais diminue l'intérêt des aciers HSS dans le domaine gouverné par les ELU. C'est ce qui explique la réduction d'intérêt de la nuance HSS S500 d'un cas à l'autre.

Néanmoins, ces observations ont été observées pour des cas dont divers paramètres ont été

fixés tels que la nuance HSS considérée, l'excentricité de la charge,... L'étude de l'influence de ces différents paramètres constitue la sous-section suivante.

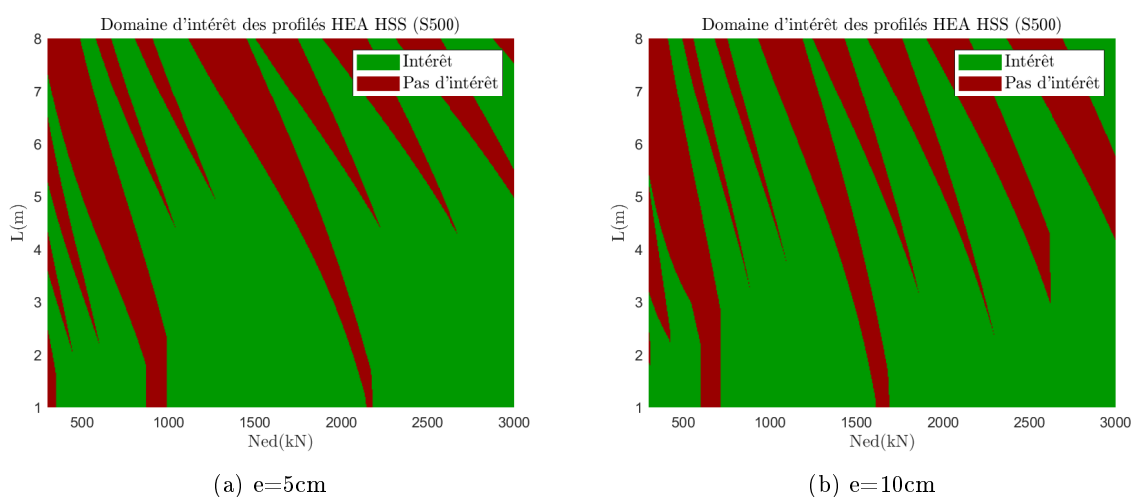
4.4.3 Comparaisons

Dans cette sous-section, diverses comparaisons vont être réalisées afin de comprendre l'influence sur les résultats que peuvent avoir les divers paramètres qui étaient fixés précédemment. Ainsi, au travers de cette sous-section, l'influence sur les résultats de l'excentricité de la charge, du choix de la nuance HSS, du critère limite de flèches, des conditions d'appuis ou encore du type de profilés choisi sera étudiée afin de tirer des conclusions sur ces paramètres.

Il est à noter que l'ensemble des comparaisons vont être réalisées pour le premier cas d'éléments comprimés-fléchis à savoir le cas où le flambement ne se fait que selon l'axe fort et dans lequel le déversement est empêché. Ce cas étant celui présentant les résultats les plus probants quant à l'intérêt économique de l'utilisation d'une nuance HSS. Il va de soi que les conclusions apportées pour ce cas seront généralisables aux autres cas.

Comparaison de différentes excentricités

Tous les résultats qui ont été représentés précédemment concernaient une excentricité de la charge axiale fixée de 10cm. L'objectif de cette première comparaison est donc d'analyser l'influence de l'excentricité de la charge sur l'intérêt de l'utilisation d'une nuance HSS. Les résultats sont repris à la FIGURE 4.79.



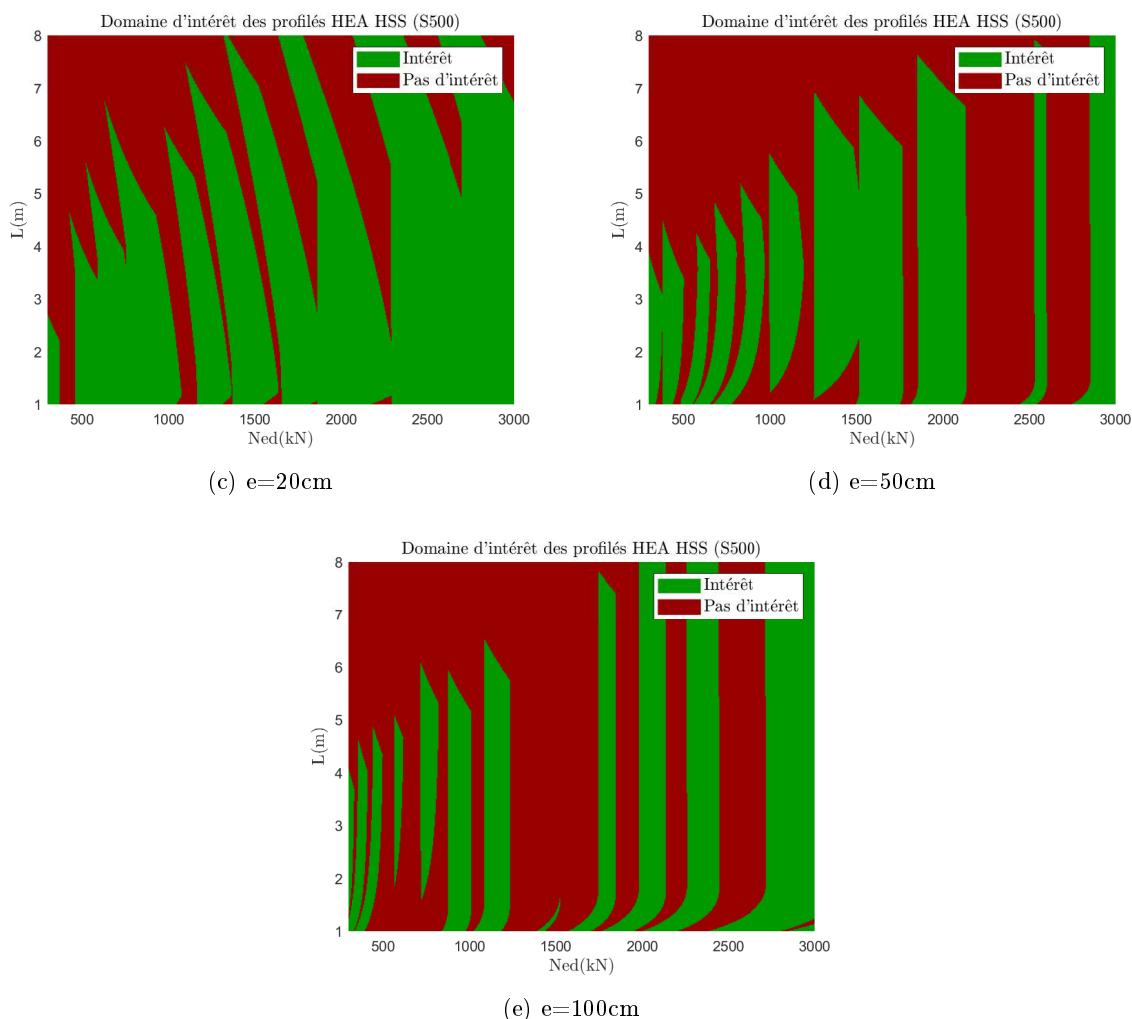


FIGURE 4.79 – Influence de l'excentricité sur les résultats d'un élément comprimé-fléchi.

La FIGURE 4.79 illustre le fait que plus l'excentricité augmente, plus les domaines d'intérêt de l'utilisation de la nuance S500 pour un profilé HEA bi-appuyé comprimé-fléchi sont restreints. Plus l'excentricité augmente plus les franges se rabattent verticalement. En effet, pour une excentricité proche de zéro, on revient au cas de la compression pure c'est à dire que les limites d'utilisation de chaque profilé suivent l'allure des courbes européennes de flambement. Tandis que lorsque l'excentricité augmente considérablement on tend vers le cas de la flexion pure. Or, comme le moment est donné par la charge axiale fois l'excentricité, il est indépendant de la longueur d'où l'allure verticale des limites d'utilisation.

Les proportions du domaine présentant un intérêt de l'utilisation de la nuance HSS ainsi que les proportions du domaine gouvernées par les ELS sont repris à la TABLE 4.3 suivante.

Eccentricité e (cm)	% du domaine présentant un intérêt de la nuance HSS	% du domaine gouverné par les ELS
0	70.84	3.76
5	74.45	0.60
10	71.14	4.88
20	64.87	11.44
50	42.28	12.04

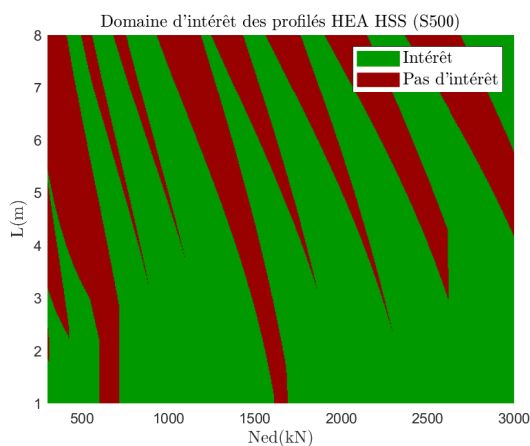
TABLE 4.3 – Pourcentage d'intérêt de la nuance HSS et du domaine gouverné par les ELS en fonction de l'excentricité.

Les chiffres de la TABLE 4.3 confirme donc que la proportion du domaine présentant un intérêt décroît en augmentant l'excentricité. Cela va de pair également avec le fait que plus l'excentricité augmente plus le pourcentage du domaine gouverné par les ELS croît.

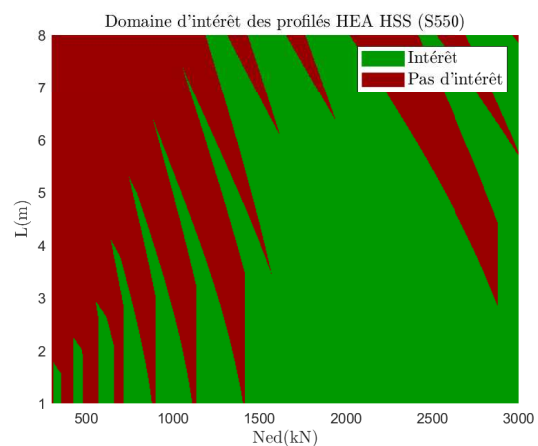
En conclusion, pour des éléments comprimés-fléchis, plus l'excentricité augmente plus les domaines d'intérêt de la nuance S500 sont restreints.

Comparaison des nuances HSS

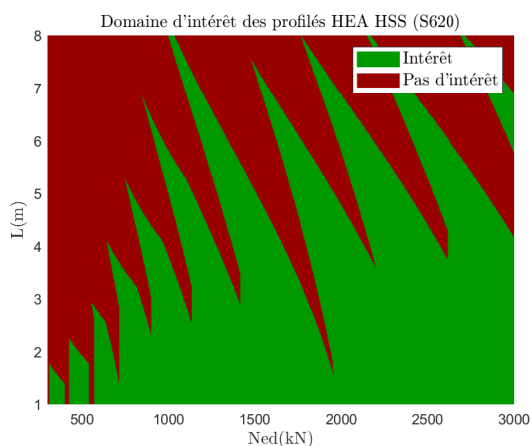
Cette deuxième comparaison consiste en l'étude de l'influence du choix de la nuance HSS sur les résultats obtenus. Les résultats pour les nuances HSS S500, S550, S620 et S690 sont repris à la FIGURE 4.80 suivante.



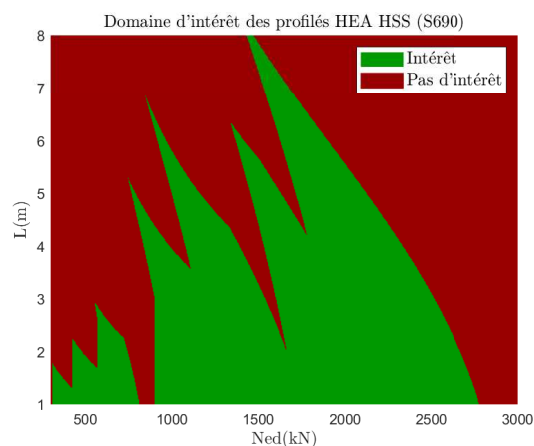
(a) Nuance HSS : S500



(b) Nuance HSS : S550



(c) Nuance HSS : S620



(d) Nuance HSS : S690

FIGURE 4.80 – Influence du choix de la nuance HSS sur l'intérêt de leur utilisation pour un élément comprimé-fléchi.

A l'instar des conclusions sur les comparaisons identiques qui avaient été établies pour les autres types d'éléments précédemment, la conclusion pour les éléments comprimés-fléchis va être semblable. En effet, bien que le passage à une nuance supérieure permette de gagner très souvent en résistance, plus la limite d'élasticité de la nuance HSS est élevée plus son coût relatif est important entraînant de ce fait une réduction du domaine d'intérêt. C'est-à-dire que le gain de matière engendré par le passage à une nuance HSS supérieure n'est pas suffisant pour compenser l'augmentation du coût relatif du passage à la nuance HSS supérieure.

Comparaison des critères limites de flèches

Cette troisième comparaison permet d'analyser l'influence du critère de flèches sur les résultats obtenus dans le cadre de l'étude de l'intérêt d'une nuance HSS pour un élément comprimé-fléchi. Les résultats pour des limites de flèches de $L/200$, $L/300$ et $L/500$ sont repris à la FIGURE 4.81.

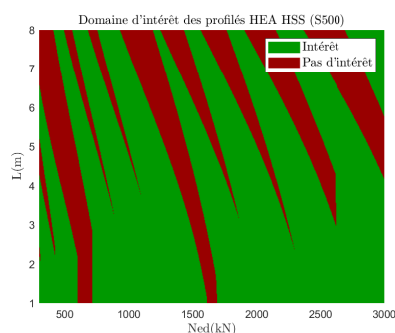
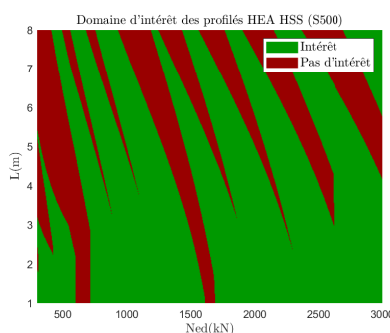
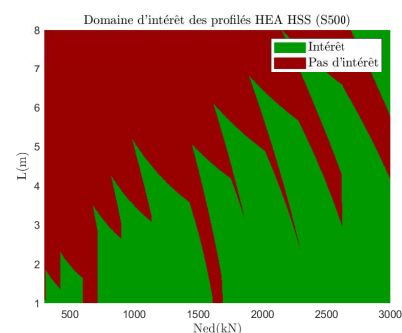
(a) Critère : $L/200$ (b) Critère : $L/300$ (c) Critère : $L/500$

FIGURE 4.81 – Influence du critère de flèches sur l'intérêt des aciers HSS pour un élément comprimé-fléchi libre de flamber selon son axe fort mais empêché de déverser.

Au vu des résultats de la FIGURE 4.81, la conclusion est que plus le critère de flèches devient strict, plus les ELS dominent le dimensionnement sur une portion plus importante du domaine. Cela peut être illustré en représentant les portions du domaine gouvernées par les ELU et celles gouvernées par les ELS. Ces portions sont représentées à la FIGURE 4.82 suivante.

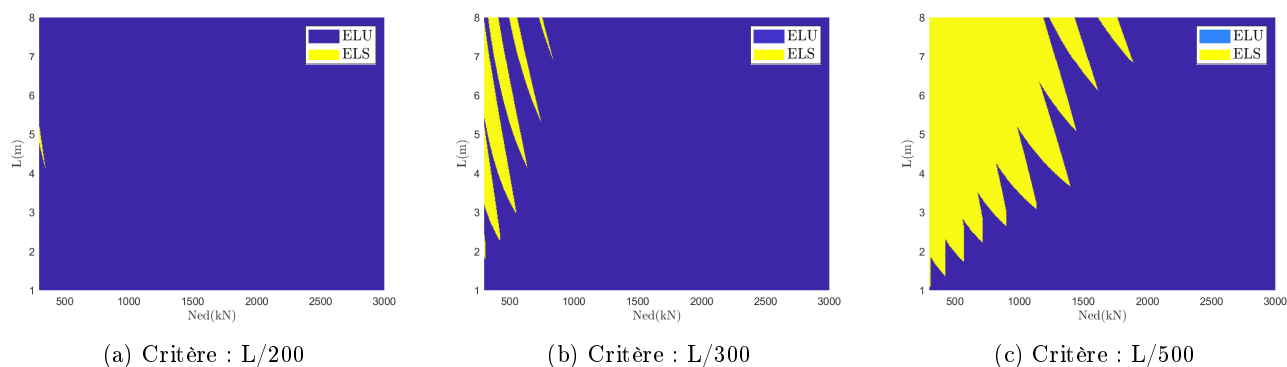


FIGURE 4.82 – Portions du domaine dont le dimensionnement est gouverné par les ELS et celui par les ELU pour un élément comprimé-fléchi.

Comparaison des conditions d'appuis

Au travers de cette comparaison, diverses conditions d'appuis vont être envisagées afin d'analyser leur influence sur les résultats préalablement obtenus pour un élément comprimé-fléchi bi-appuyé.

Les deux autres conditions d'appuis sont le cas où l'élément comprimé-fléchi est encastré-libre et le cas où l'élément comprimé-fléchi est encastré-appuyé. Les diagrammes MNV relatifs à ces conditions d'appuis sont repris à la FIGURE 4.83.

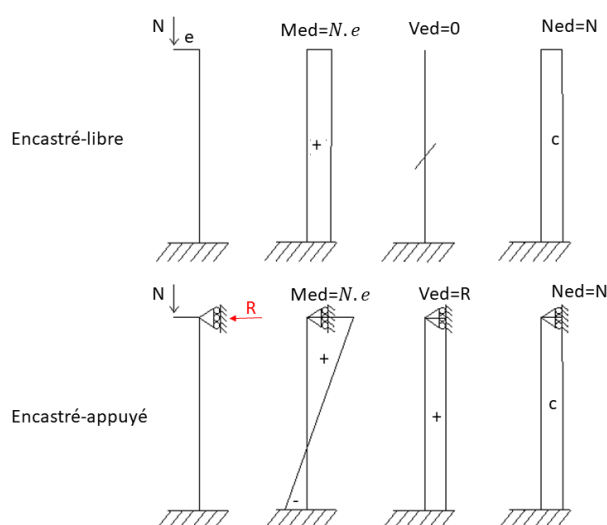


FIGURE 4.83 – Diagrammes MNV des différentes conditions d'appuis pour un élément comprimé-fléchi.

Le cas encastré-libre est isostatique, ce qui permet de connaître directement les efforts. A l'inverse, pour le cas encastré-appuyé hyperstatique, il est nécessaire de déterminer la réaction d'appui supplémentaire. Celle-ci s'obtient comme suit :

A l'appui à rouleau, la déformée vaut 0, on a donc la relation suivante (méthode des forces) :

$$f_{\text{Moment au sommet}} + f_{\text{Réaction d'appui}} = 0 \quad (4.35)$$

En utilisant combinant ces deux cas simples, on peut donc obtenir la réaction R :

$$\frac{M \cdot L^2}{2EI} = \frac{R \cdot L^3}{3EI} \leftrightarrow R = \frac{3 \cdot M}{2 \cdot L} = \frac{3 \cdot N_{ed} \cdot e}{2 \cdot L}$$

Connaissant la réaction d'appui R, on peut connaître le moment d'encastrement par équilibre de rotation autour du point encastré.

$$N_{ed} \cdot e - R \cdot L - M = 0 \leftrightarrow M = \frac{-N_{ed} \cdot e}{2}$$

Une fois l'analyse élastique réalisée et les coefficients tels que le coefficient de flambement dépendant des conditions d'appuis ou les coefficients dépendants du diagramme de moment déterminés, la routine MATLAB fournit les résultats représentés à la FIGURE 4.84 suivante.

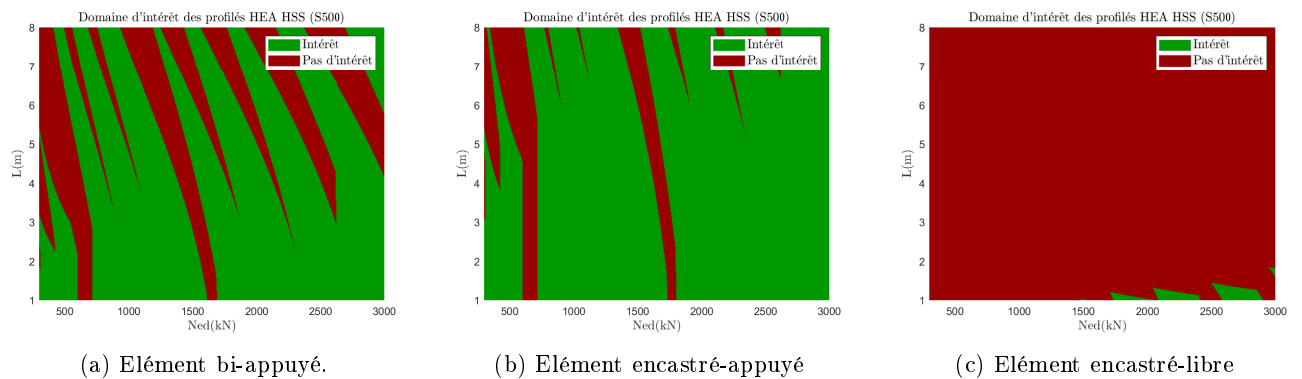


FIGURE 4.84 – Influence des conditions d'appuis sur les résultats pour un élément comprimé-fléchi avec flambement dans le plan sans déversement.

Diverses explications peuvent être amenées afin d'expliquer les résultats illustrés à la FIGURE 4.84, à savoir :

- Lorsque l'élément est encastré-appuyé plutôt que bi-appuyé, le coefficient de flambement selon l'axe fort est réduit ($K=0.7$ au lieu de 1.0). Les risques de périr par instabilités pour un élément encastré-appuyé sont donc moins importants que pour l'élément bi-appuyé. De plus, les flèches sont réduites dans le cas encastré-appuyé par rapport au cas bi-appuyé (La formule est $\frac{ML^2}{27EI}$ au lieu de $\frac{ML^2}{16EI}$), cela a donc aussi tendance à accroître la domi-

nance des ELU dans le domaine et donc à fortiori cela accroît l'intérêt économique des HSS dans le domaine. Les portions du domaine gouvernés par les ELS et par les ELU pour les différentes conditions d'appuis sont reprises à la FIGURE 4.85.

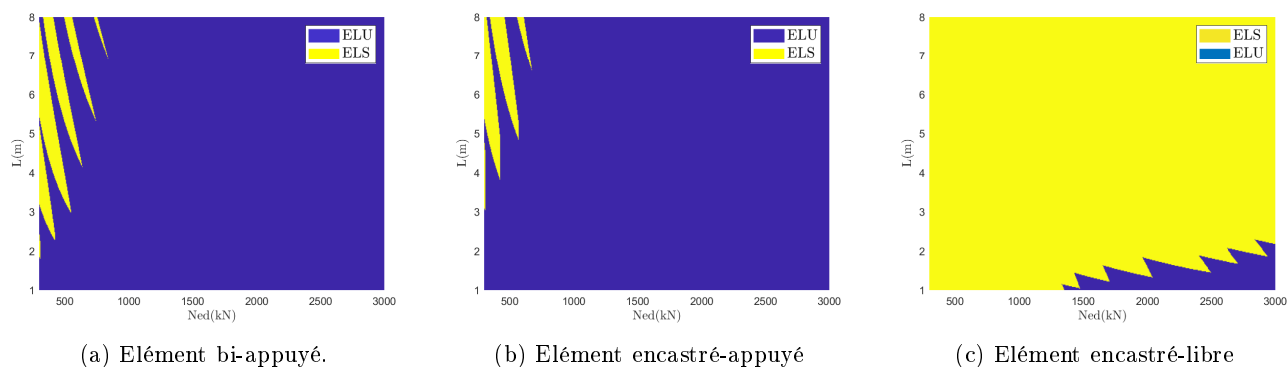


FIGURE 4.85 – Portions du domaine gouvernées par les ELS et par les ELU pour les différentes conditions d'appuis.

- A l'inverse, en ce qui concerne le cas encastré-libre, celui-ci présente un coefficient de flambement plus grand que les deux autres cas ($K=2.0$ dans ce cas), ce qui explique que l'intérêt soit moindre pour cette condition d'appuis. De plus, le critère de flèches est également plus strict pour ce cas (La formule est $\frac{ML^2}{2EI}$ au lieu de $\frac{ML^2}{16EI}$). Ceci explique que les ELS soient beaucoup plus déterminants dans ce dernier cas et à fortiori que l'intérêt soit minime comme illustré aux FIGURES 4.84 et 4.85.

Comparaison du type de profilé choisi

Pour cette dernière comparaison, il convient de comparer les résultats obtenus pour diverses gammes de profilés. Les types de profilés : HEA, HEB, HEC et HEM seront comparés afin de tirer des conclusions sur cette comparaison.

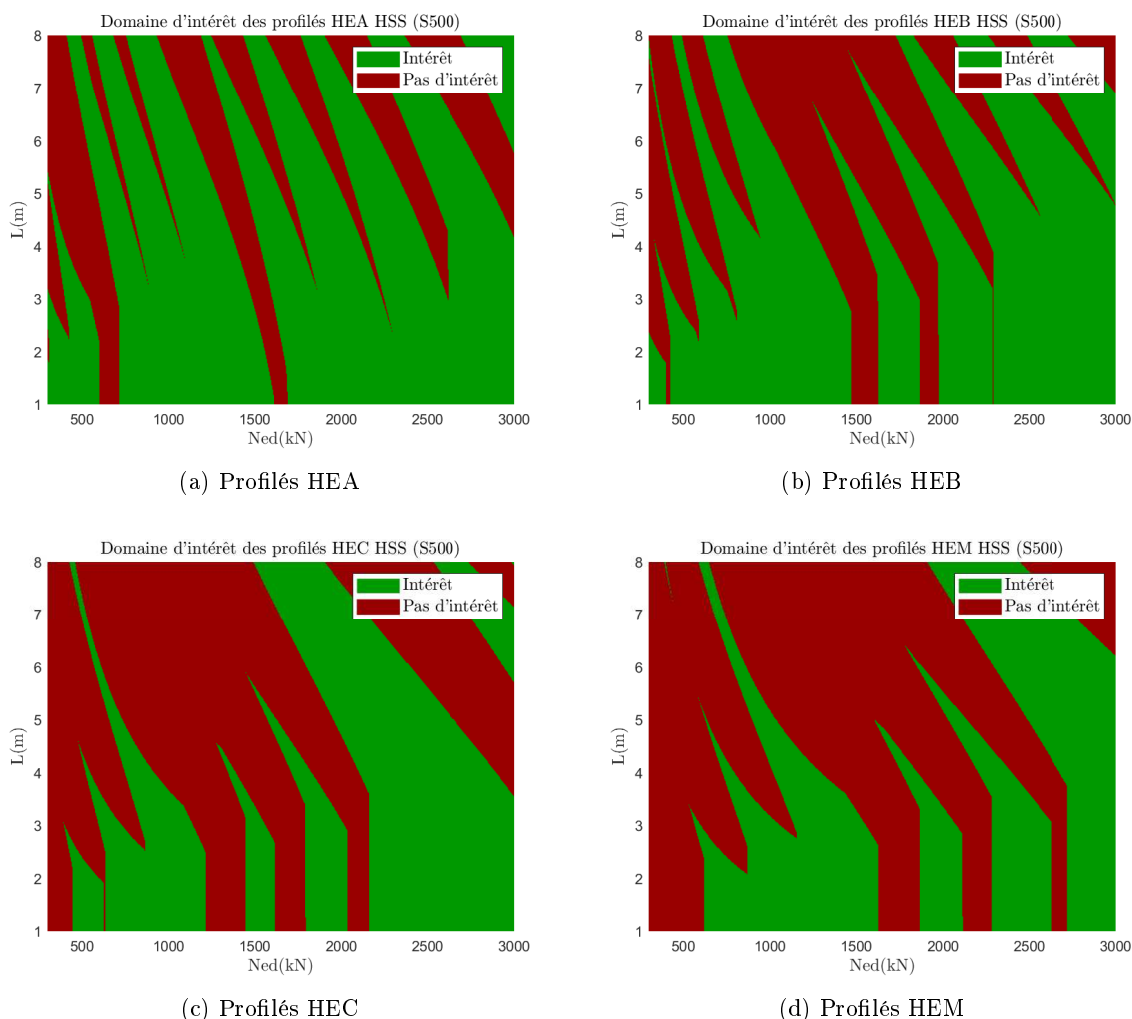


FIGURE 4.86 – Influence du choix du type de profilés sur l'intérêt pour un élément comprimé-fléchi (colonne bi-appuyée, nuance HSS S500 et flambement selon l'axe fort sans déversement).

La comparaison des profilés montre, tout comme les comparaisons des gammes de profilés réalisées pour les autres types d'éléments, une réduction de l'intérêt des aciers HSS plus la massivité de la gamme est importante. A nouveau, ces résultats sont à relativiser puisque les gammes de profilés dont la massivité est plus importante ont été conçues pour reprendre des charges plus importantes que celles qui ont été considérées dans ce travail. Il conviendrait donc d'adapter le domaine d'étude d'intérêt par rapport aux charges ciblées d'utilisation des gammes de profilés afin d'avoir des conclusions plus affinées.

4.4.4 Méthodes d'évaluation de l'intérêt d'une nuance HSS

Parallèlement à ce qui a été fait pour les autres types d'éléments considérés précédemment dans l'étude locale, deux méthodes ont été établies afin que le concepteur, l'utilisateur puisse déterminer si la nuance HSS qu'il considère a un intérêt économique.

Il est à noter, qu'étant donné la complexité des équations régissant le dimensionnement

d'éléments comprimés-fléchis, il est très difficile de regrouper certaines équations pour établir un critère. Les limites d'utilisation des profilés ont donc été déterminées en suivant la procédure de dimensionnement classique de l'Eurocode 3 [1]. Cette procédure ne sera pas détaillée pour les éléments comprimés-fléchis puisque celle-ci n'apporte aucune information complémentaire.

Méthode 1 : méthode déterminant directement les profilés requis

Cette première méthode permet à l'utilisateur d'obtenir directement le résultats des deux designs pour les deux nuances comparées soit graphiquement soit numériquement. En effet, la routine développée à l'aide du logiciel MATLAB permet de fournir les limites d'utilisation des différents profilés de la gamme considérée. Ces graphiques pourraient être utilisés afin que l'ingénieur connaisse directement les profilés requis pour les deux nuances comparées, il pourrait ensuite comparer les rapports de poids avec le coût relatif de la nuance HSS qu'il considère pour justifier de l'intérêt économique ou non de cette dernière. Cependant, une fois la routine implémentée pour établir ces graphiques, il est assez aisé de rajouter quelques conditions afin que la routine réponde à toutes les questions de l'utilisateur directement. Un exemple d'utilisation de la routine est le suivant.

Les questions suivantes sont posées à l'utilisateur :

```

Quelle est la longueur de la colonne (en m)?7
Quels sont les conditions d'appuis?
1: Bi-appuyé
2: encastré-libre
3: encastré-appuyé
1
Que vaut la charge utile (sans poids propre) appliquée sur la colonne (en kN)?2000
Que vaut l'excentricité de la charge? (mm)100
Quel est le critère de flèches à respecter (ELS)? L/300
Pour quelle nuance d'acier haute performance voulez-vous étudier l'intérêt? S500
Quelle gamme de profilés voulez-vous étudier?
1: HEA
2: HEB
3: HEC
4: HEM
5: Tous
1
Quel cas d'étude voulez-vous considérer ?
1: Flambement dans le plan (axe fort) sans prise en compte du déversement
2: Flambement dans l'espace (axe fort/axe faible) sans prise en compte du déversement
3: Flambement dans l'espace (axe fort/axe faible) avec prise en compte du déversement
1|

```

FIGURE 4.87 – Questions posées par la routine à l'utilisateur.

La routine MATLAB fournit alors les FIGURE 4.88 suivante localisant dans le domaine le cas entré par l'utilisateur.

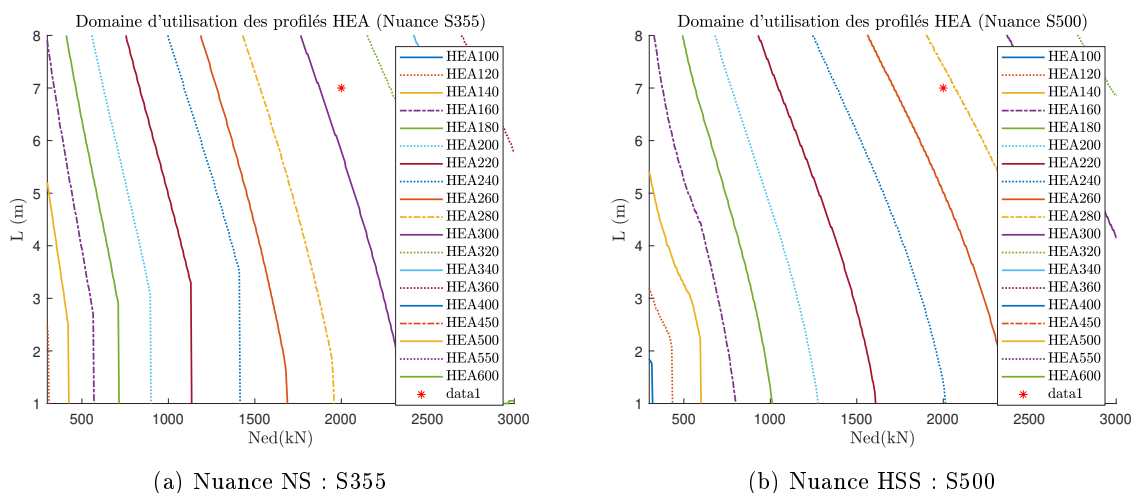


FIGURE 4.88 – Figures fournies par le code.

La routine fournit également le type de profilé requis pour les deux nuances numériquement. Enfin, celle-ci demande à l'utilisateur le coût relatif de la nuance HSS qu'il considère afin de déterminer si l'utilisation de cette nuance HSS a un intérêt économique ou non.

```

Le profilé requis avec du S355 est: HEA320
Le profilé requis avec du S500 est: HEA280
Que vaut le coût relatif de la nuance HSS par rapport à la nuance S355? 1.187
Le rapport de poids des deux profilés requis vaut: 1.2785 il y a donc un intérêt !
>> |

```

FIGURE 4.89 – Fin de l'exécution de la routine MATLAB.

Cette première méthode permet donc à l'aide d'une solution graphique ou numérique de déterminer l'intérêt de la nuance HSS considérée.

Méthode 2 : méthode donnant directement le rapport de poids entre les deux designs

Cette deuxième méthode consiste à fournir aux concepteurs des diagrammes reprenant l'ensemble des rapports de poids entre les deux profilés requis pour les deux nuances comparées. Le concepteur, connaissant le coût relatif de la nuance HSS qu'il étudie, pourra donc déterminer directement les portions du domaine pour lesquelles son acier HSS a un intérêt économique. En guise d'exemple, la FIGURE 4.90 reprend les rapports de poids du domaine pour un élément comprimé-fléchi libre de flamber selon son axe fort mais empêché de déverser (nuance HSS = S500).

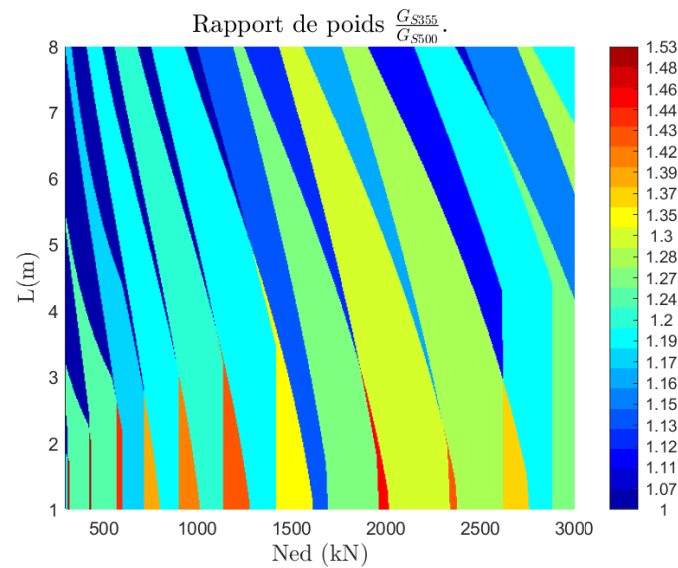


FIGURE 4.90 – Rapports de poids pour un élément comprimé-fléchi libre de flamber selon son axe fort et empêché de déverser (nuance HSS : S500).

Comme mentionné dans les autres sections de l'étude locale, cette deuxième méthode semble la plus rapide pour déterminer l'intérêt d'une nuance HSS. Elle nécessite, cependant, de réaliser le design par la suite puisque cette méthode ne fournit pas le résultat des designs à la différence de la première méthode.

Cette FIGURE 4.90 représente le résultat final des réflexions menées sur la détermination de l'intérêt d'une nuance HSS pour certains paramètres fixés. Les autres diagrammes pour d'autres cas de figure sont repris dans les annexes de ce travail de fin d'étude.

Chapitre 5

Etude économique

Ce chapitre a pour objectif d'étudier l'influence du coût relatif de la nuance HSS par rapport à la nuance RS sur les résultats obtenus lors de l'étude locale.

L'hypothèse forte réalisée au cours de ce travail est le fait que les coûts de fabrication et de transport sont considérés les mêmes que ce soit pour une nuance RS ou une nuance HSS. Les coûts relatifs considérés sont donc des rapports entre le coût de la matière pour l'acier HSS et le coût de la matière pour l'acier RS. Il va de soi qu'en réalité puisqu'on nécessitera moins de matière avec la nuance HSS qu'avec la nuance RS pour supporter la même charge, les coûts de transport devraient être moins élevés pour la nuance HSS. A l'inverse, l'utilisation des aciers HSS amène des difficultés concernant le soudage, ces difficultés pouvant conduire à des surcoûts. Cependant, l'approximation de ne considérer que les coûts relatifs à la matière est réalisée pour faciliter la comparaison et parce qu'il est difficile de se donner des coûts de transport et de fabrication pour ces nouvelles nuances HSS. En effet, les profilés en acier HSS ne sont pas encore commercialisés à l'heure actuelle il est donc difficile de se procurer des coûts de référence.

Le fait d'augmenter la limite d'élasticité d'un profilé laminé en utilisant un acier HSS plutôt qu'un acier RS a pour effet d'augmenter sa résistance en section proportionnellement à l'augmentation de la limite d'élasticité. Effectivement, l'effort axial résistant, l'effort tranchant résistant et le moment résistant d'un élément sont proportionnels à la limite d'élasticité du matériau utilisé (en l'absence de toute sorte d'instabilité). Ainsi, par exemple, si on double la limite d'élasticité d'un matériau, on aura besoin de deux fois moins de matière pour résister à la même charge. Lorsque la matière est pleinement utilisée (résistance en section), le coût relatif de la matière peut être approximé par la formule suivante (article [10]) :

$$\frac{C_{HSS}}{C_{RS}} \approx \sqrt{\frac{355}{f_y}} \quad (5.1)$$

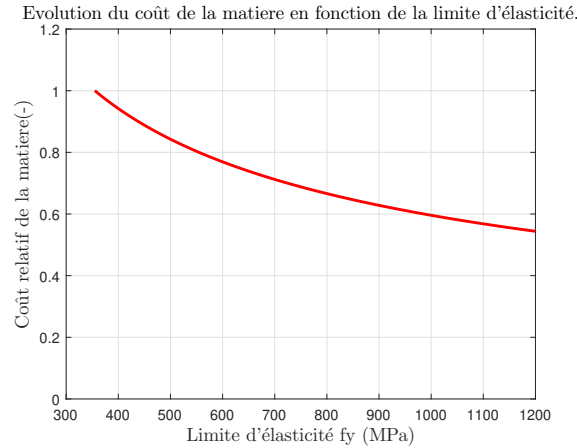


FIGURE 5.1 – Coût relatif de la matière en fonction de la limite d'élasticité.

Malheureusement, d'autres phénomènes viennent s'opposer à l'intérêt de l'utilisation des aciers HSS comme par exemple :

— Les instabilités de flambement ou de déversement :

Dans de nombreux cas, le fait d'utiliser une nuance HSS plutôt qu'une nuance RS permettra de diminuer les dimensions du profilé requis. Malheureusement, le fait de diminuer les dimensions aura pour effet d'augmenter l'élancement du profilé et donc d'augmenter les risques d'instabilités. Le coefficient de pénalisation permettant de prendre en compte les instabilités dans le calcul de la résistance sera donc toujours plus pénalisant pour la nuance HSS que pour la nuance RS.

— Les conditions limites de service (ELS) :

Les conditions limites de service ont la particularité de ne pas dépendre de la limite d'élasticité du matériau, elles requièrent donc le même profilé que l'élément soit réalisé en acier RS ou en acier HSS. De ce fait, lorsque les conditions limites de service domineront, il n'y aura pas d'intérêt d'utiliser un acier HSS plutôt qu'un acier RS.

Ces divers phénomènes qui vont à l'encontre de l'intérêt de l'utilisation des aciers HSS ont pu être étudiés dans le chapitre relatif à l'étude locale.

Cependant, il est possible de trouver des solutions pour limiter l'impact de ces phénomènes sur le dimensionnement. Par exemple, diminuer le coefficient de flambement d'un élément ou encore l'utilisation d'une contre-flèche afin de réduire la dominance des ELS sur le dimensionnement. Ce chapitre prendra en compte ces aspects afin de justifier de leur intérêt.

Finalement, en guise de rappel pour la bonne compréhension de ce chapitre, l'utilisation d'un acier HSS plutôt qu'un acier RS a un intérêt économique si :

$$\boxed{\frac{G_{RS}}{G_{HSS}} = \frac{A_{RS}}{A_{HSS}} > \frac{c_{HSS}}{c_{RS}}} \quad (5.2)$$

5.1 Éléments en traction pure

Le premier élément considéré au travers de l'étude locale de ce travail de fin d'étude fût les éléments en traction pure. Ce type d'élément a la particularité de résister en section c'est-à-dire qu'il n'est sujet à aucune forme d'instabilités. Les résultats sont donc indépendants de la longueur de l'élément considéré, il est donc possible de représenter l'évolution du rapport de poids entre les deux profilés requis pour les deux nuances comparées en fonction de la charge de traction appliquée. Ces représentations pour les 4 nuances HSS et pour la gamme de profilés HEA sont reprises à la FIGURE 5.2 suivante.

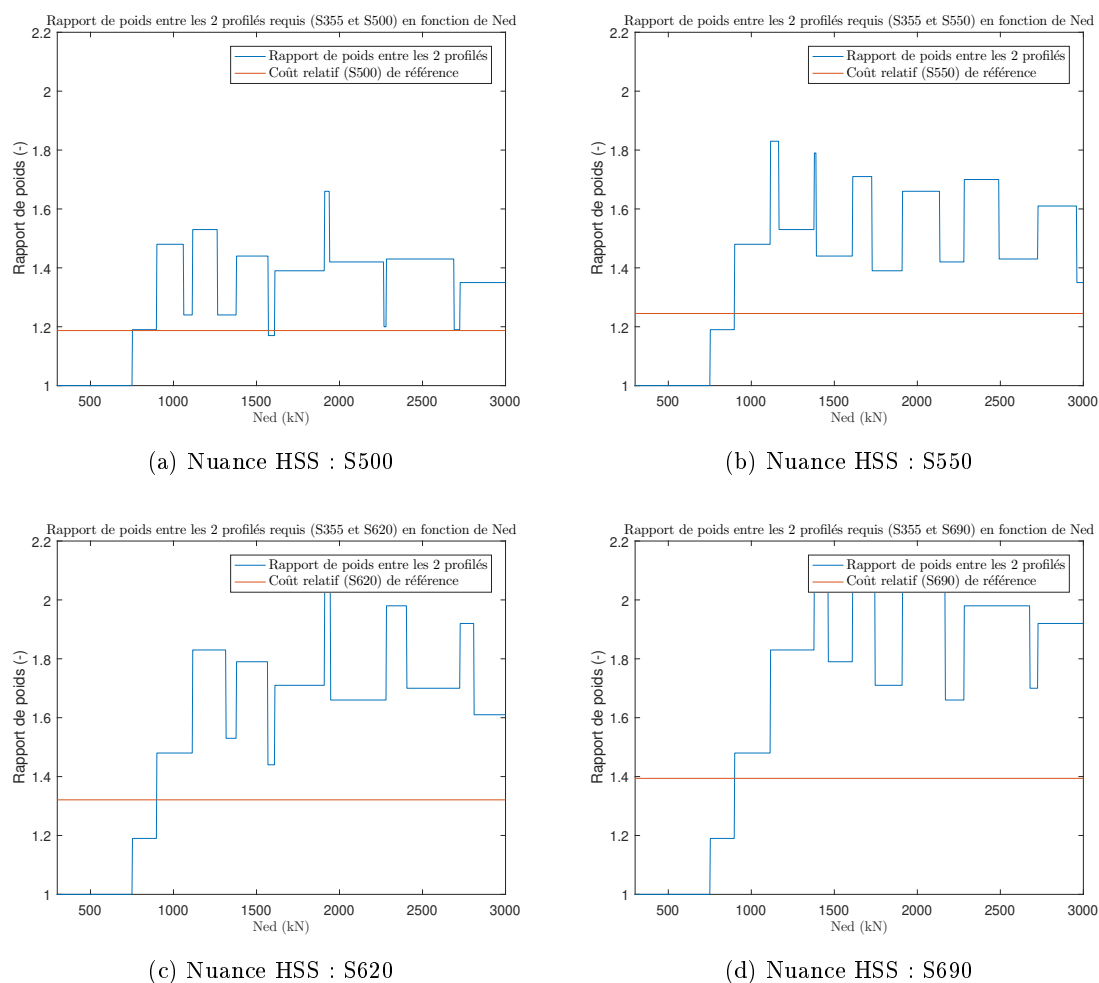


FIGURE 5.2 – Evolution du rapport de poids entre les deux profilés HEA requis pour les deux nuances comparées en fonction de la charge de traction appliquée.

Sur base de ces représentations reprises à la FIGURE 5.2, de la condition 5.2 et du coût relatif de la nuance HSS, il est donc assez aisé de déterminer les portions du domaine pour lesquelles l'utilisation d'un acier HSS présentera un intérêt économique plutôt qu'une nuance RS.

Par exemple, la FIGURE 5.2 (a) permet d'expliquer les résultats repris à la FIGURE 4.2 (a). En effet, les bandes verticales à la FIGURE 4.2 (a) ne présentant pas d'intérêt de l'utilisation de la nuance HSS (représentées en rouge sur cette figure) correspondent aux charges pour lesquelles le rapport de poids est inférieur au coût relatif sur la FIGURE 5.2 (a). Une autre constatation est

que le gain engendré par le passage à une limite d'élasticité supérieure semble augmenter plus vite que le coût relatif de référence ce qui marque l'intérêt des aciers HSS pour un élément tendu. Effectivement, plus on augmente la limite d'élasticité, plus les rapports de poids s'écartent du coût relatif de référence. Cependant ce coût relatif est un coût relatif de référence il faudrait donc le faire varier.

Un autre moyen de représenter l'influence du coût relatif serait de représenter l'évolution du pourcentage du domaine présentant un intérêt de la nuance HSS en fonction du coût relatif de la nuance HSS. En effet, afin de maximiser l'utilisation d'une certaine nuance il convient de maximiser les domaines possibles d'utilisation en fixant un coût relatif le plus judicieusement possible. Cette représentation est reprise à la FIGURE 5.3.

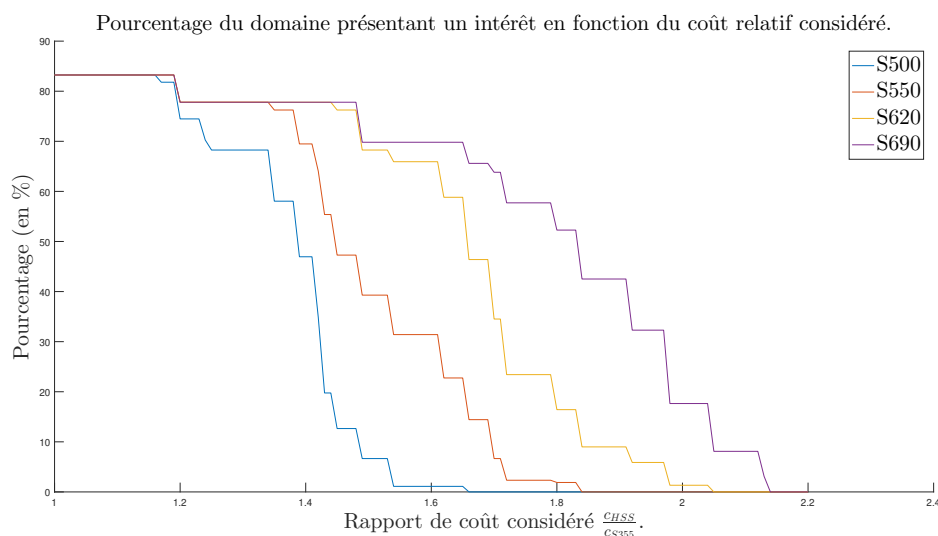


FIGURE 5.3 – Evolution du pourcentage d'intérêt de la nuance HSS en fonction du coût relatif de cette nuance.

Il est utile de préciser que le pourcentage du domaine ne débute pas à 100% pour la simple et bonne raison que la zone où le premier profilé de la gamme considérée suffit pour les deux nuances comparées ne présentera jamais d'intérêt économique.

De plus, par exemple, si le coût relatif de la nuance S690 reste inférieur à 1.62, le pourcentage du domaine reste proche voire supérieure des 70%. La FIGURE 5.3 pourrait donc être utilisée par un sidérurgiste afin de fixer un coût relatif de sa matière.

Ainsi, des intervalles de coûts relatifs peuvent être déterminés sur base de cette étude.

$$\frac{c_{S500}}{c_{S355}} \in [1.01 \ 1.66] ; \frac{c_{S550}}{c_{S355}} \in [1.01 \ 1.84] ; \frac{c_{S620}}{c_{S355}} \in [1.01 \ 2.05] ; \frac{c_{S690}}{c_{S355}} \in [1.01 \ 2.14]$$

Au delà des bornes supérieures des intervalles ci-dessus, il y a 0% du domaine présentant un intérêt d'utiliser la nuance HSS plutôt que la nuance RS. Il est à préciser que ces pourcentages et intervalles ont été déterminé en considérant $N_{ed} \in [300 \ 3000]$ kN. Si cet intervalle change, les pourcentages changeront également. Il en va de même pour la gamme de profilé considéré. Ici l'étude économique s'est basée sur les profilés laminés HEA dans un certain domaine de chargement propre à la construction de bâtiments classiques, comme mentionné précédemment.

5.2 Eléments en compression pure

Ce deuxième type d'élément considéré concerne les éléments en compression pure. Ce type d'élément présente la particularité de pouvoir périr par instabilités si l'élancement et le chargement sont tels que le flambement par flexion de l'élément apparaisse. A la différence des éléments tendus, il y a donc cette fois une dépendance de la longueur de l'élément. Seul le cas avec prise en compte du flambement sera étudié puisque le cas sans est identique au cas des éléments tendus comme cela a pu être montré dans l'étude locale.

Il a été décidé de représenter les rapports de poids de la même façon que pour le chapitre de l'étude locale puisque la dépendance de la longueur empêchait des représentations 2D analogues à celles réalisées pour les éléments en traction pure. Une deuxième raison est que, connaissant le coût relatif de la nuance HSS, ces représentations permettent de visualiser directement les zones d'intérêt de cette nuance dans le domaine.

Les rapports de poids dans l'entièreté du domaine pour les 4 nuances HSS sont reprises à la FIGURE 5.4.

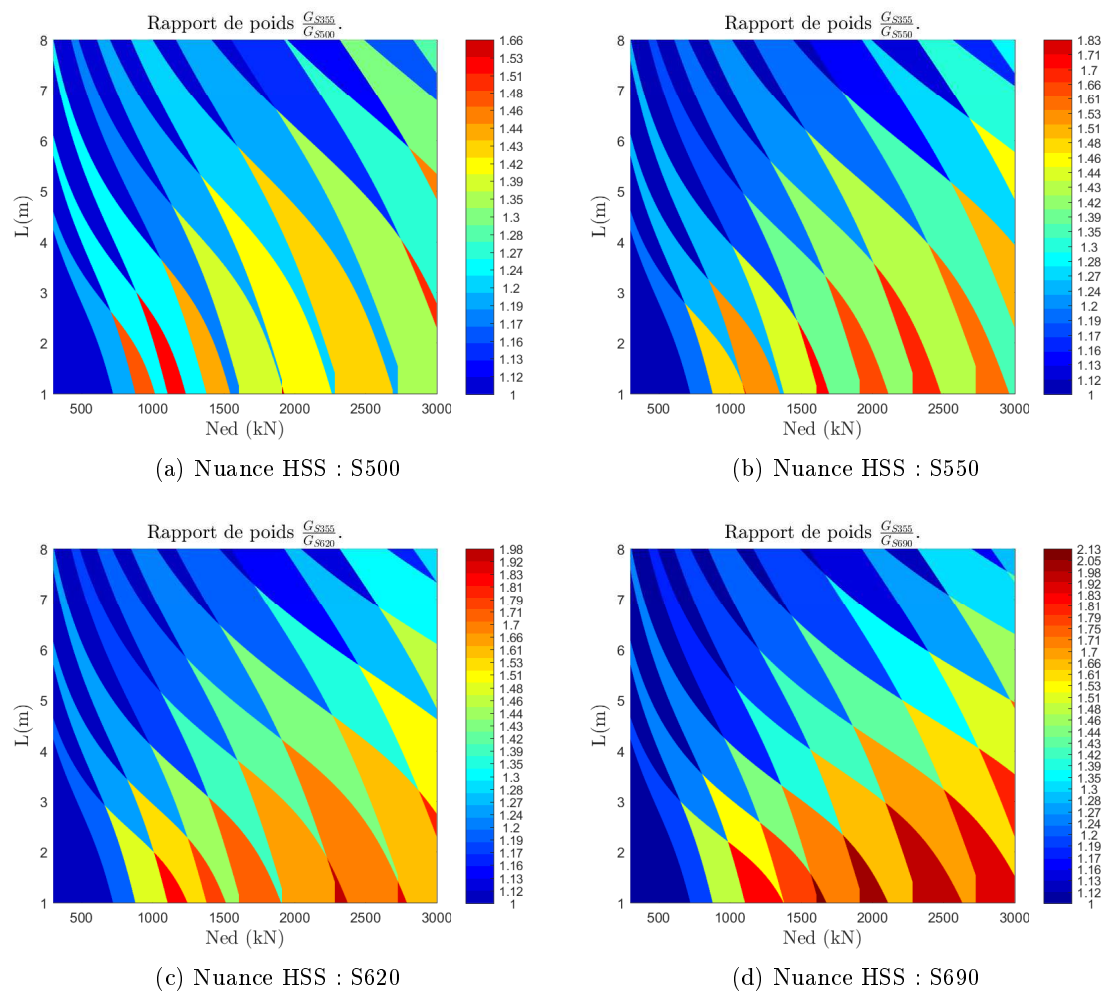


FIGURE 5.4 – Rapport de poids entre les deux profils requis pour les deux nuances comparées en fonction de la charge de compression appliquée et de la longueur.

De façon analogue à ce qui a été fait pour la traction pure, les proportions du domaine présentant un intérêt de l'utilisation des différentes nuances HSS ont été représentées à la FIGURE 5.5 suivante.

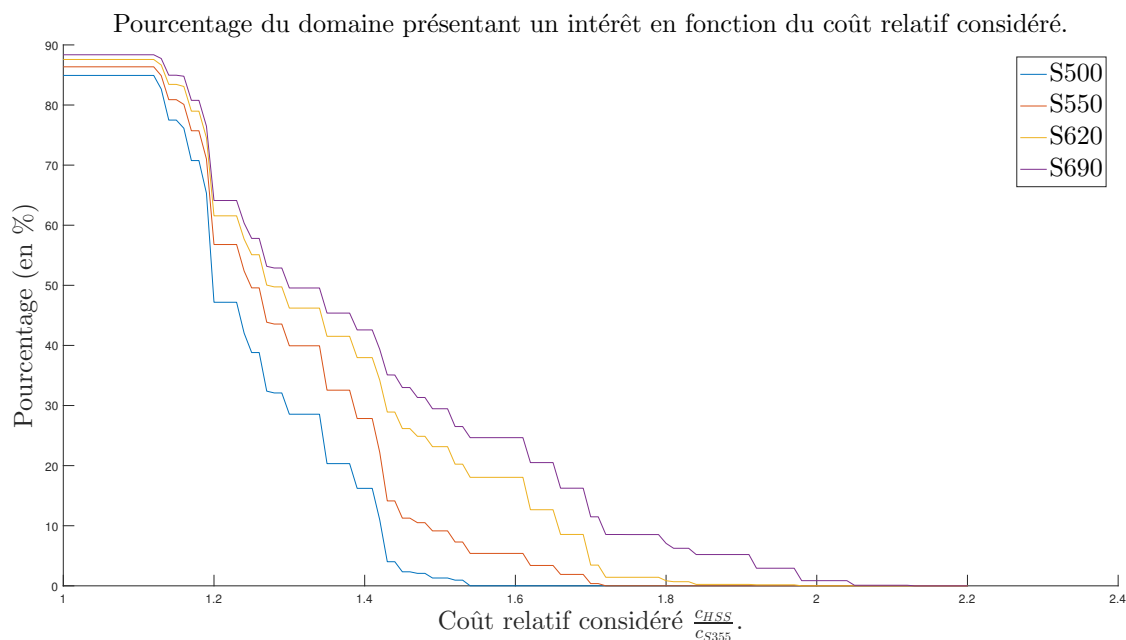


FIGURE 5.5 – Evolution du pourcentage d'intérêt de la nuance HSS en fonction du coût relatif de cette nuance.

Au vu de la FIGURE 5.5, les courbes d'évolution du pourcentage du domaine présentant un intérêt pour les 4 nuances HSS semblent être plus proches que dans le cas des éléments en traction pure.

Cela signifie que si deux nuances HSS présentent des coûts relatifs très proches, le gain engendré en prenant la nuance avec la plus haute limite d'élasticité sera assez peu significatif. Les zones du domaine qui vont être affectées par ce changement sont celles pour lesquelles l'élancement de l'élément est faible (éléments trapus, résistance en section). En effet, pour les zones présentant des élancements élevés, les résistances en compression pure seront pratiquement identiques peu importe la nuance considérée. L'intérêt économique de l'utilisation d'une nuance HSS plutôt qu'une autre sera donc plus faible que dans le cas des éléments tendus puisque ceux-ci ne présentent pas d'instabilités.

5.3 Eléments en flexion pure

A l'instar de ce qui avait été fait dans le chapitre relatif à l'étude locale, l'étude économique se penchera sur différents types de poutres à savoir :

- Les poutres secondaires bi-appuyées et bi-encastrées (chargement uniforme)
- Les poutres primaires bi-appuyées et bi-encastrées (chargement ponctuel)

Les cas sans puis avec prise en compte du déversement seront étudiés de façon analogue à ce qui avait été fait pour ce type d'éléments dans le chapitre relatif à l'étude locale. Afin d'éviter toute redondance dans les explications apportées sur les diagrammes représentés, les résultats seront discutés uniquement pour la nuance HSS S500 et pour des profils IPE. Toutes les études économiques sont basées sur les diagrammes de rapports de poids, ceux-ci seront tous repris dans l'annexe C.

5.3.1 Poutres secondaires

Ce premier type de poutres correspond au type le plus courant à savoir des poutres soumises à une charge uniformément répartie.

Poutres secondaires bi-appuyées

Les rapports de poids pour les poutres secondaires bi-appuyées **sans prise en compte du déversement** sont repris à la FIGURE 5.6.

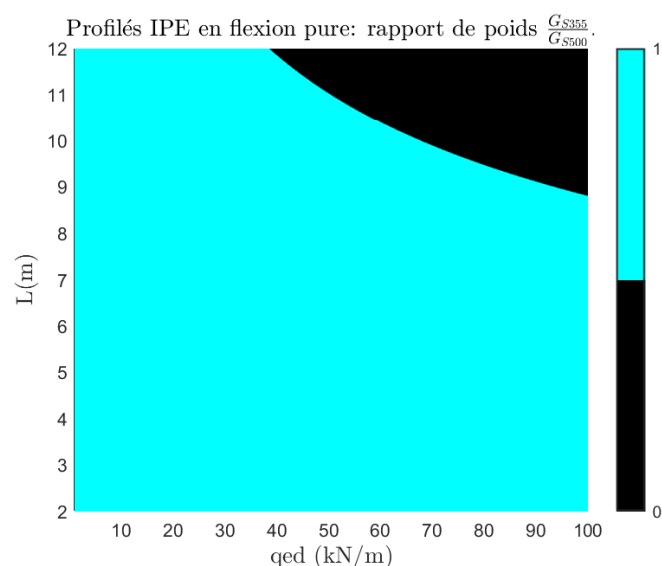


FIGURE 5.6 – Rapport de poids entre les profils requis pour les deux nuances comparées pour une poutre secondaire bi-appuyée empêchée de déverser.

La zone possédant un rapport de poids nul correspond à une zone que le dernier profilé de la gamme considérée est incapable d'atteindre. En effet, dans cette zone, l'IPE600 n'a pas les dimensions suffisantes. En ce qui concerne les résultats, la FIGURE 5.6 montre que les profils requis pour les nuances S500 et S355 sont les mêmes (rapport de poids vaut 1). Cela s'explique par le fait que tout le domaine considéré est gouverné par les ELS comme cela a été montré dans la section relative à ces éléments dans l'étude locale. Il va donc de soi que peu importe le coût relatif de la nuance S500 considéré, il n'y aura jamais d'intérêt économique à utiliser cette nuance plutôt que la S355.

Les rapports de poids pour les poutres secondaires bi-appuyées **avec prise en compte du déversement** sont repris à la FIGURE 5.7.

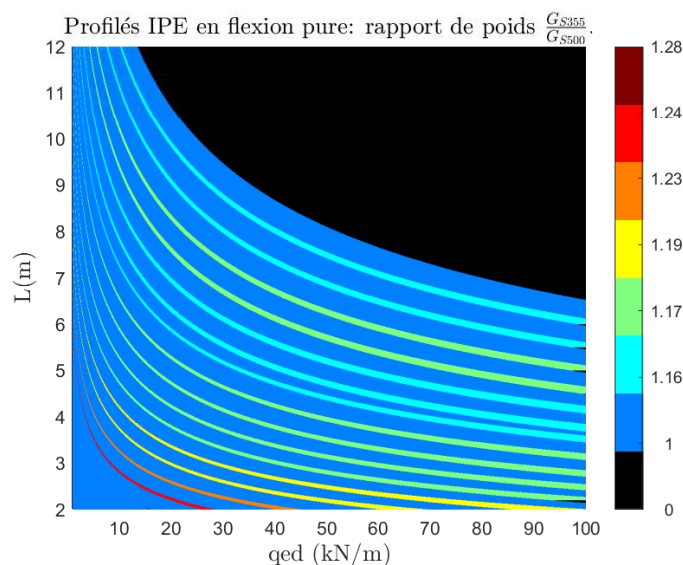


FIGURE 5.7 – Rapport de poids entre les profils requis pour les deux nuances comparées pour une poutre secondaire bi-appuyée libre de déverser.

Lorsque le déversement est pris en compte, le domaine n'est quasiment plus gouverné par les ELS, cela permet d'avoir des zones possibles d'intérêt. Selon la condition (5.2) et au vu de la FIGURE 5.7, il faudrait que le coût relatif de la nuance HSS S500 soit inférieur à 1.16 pour disposer de quelques zones d'intérêt de l'utilisation de la nuance S500. Au dessus d'un coût relatif de la nuance S500 de 1.19 il n'y a quasiment plus aucune zone du domaine présentant un intérêt de l'utilisation de cette nuance.

Poutres secondaires bi-encastrées

Ce deuxième type de poutres secondaires est celui qui a été identifié dans l'étude locale comme celui présentant les zones d'intérêt des nuances HSS les plus marquées. Les rapports de poids entre les deux profils requis pour le cas **sans prise en compte du déversement** sont repris à la FIGURE 5.8.

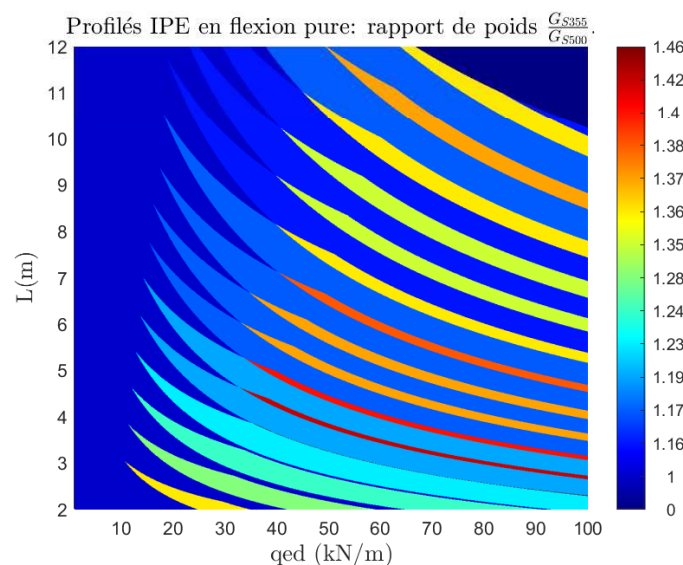


FIGURE 5.8 – Rapport de poids entre les profils requis pour les deux nuances comparées pour une poutre secondaire bi-encastree empêchée de déverser.

Au vu de la FIGURE 5.8, il existe une portion du domaine assez significative dans laquelle il y a un intérêt potentiel à utiliser la nuance S500. Cependant, les rapports de poids entre les deux profils requis sont relativement bas. Afin d'analyser la sensibilité des résultats en fonction du coût relatif de la nuance S500 considéré, le pourcentage du domaine ayant un intérêt en fonction du coût relatif de la nuance S500 est représenté à la FIGURE 5.9.

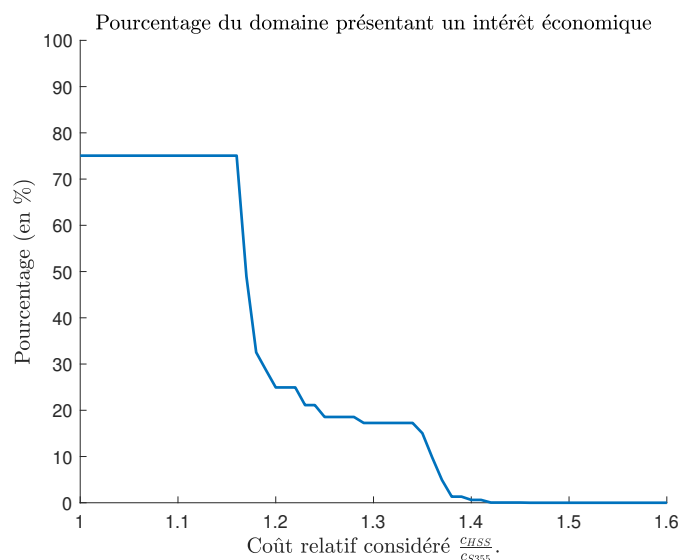


FIGURE 5.9 – Evolution du pourcentage d'intérêt de la nuance HSS en fonction du coût relatif de cette nuance.

La FIGURE 5.9 illustre bien le fait que 25% du domaine ne présentera jamais un intérêt économique d'utiliser la nuance S500 plutôt que la nuance S355. Cela provient en grande partie de la dominance des ELS dans cette zone du domaine. L'intérêt d'une contre-flèche initiale de la poutre va donc être étudié ultérieurement dans ce chapitre. De plus, lorsque le coût relatif de la nuance S500 excède 1.16, le pourcentage chute considérablement de telle sorte que l'intérêt

de la nuance S500 se restreint à quelques petites portions du domaine. En effet, lorsque le coût relatif vaut 1.16 le pourcentage du domaine présentant un intérêt est de 75.07% puis lorsqu'on passe à un coût relatif de 1.17 le pourcentage chute à 48.97%, 1.18 \Rightarrow 32.52%, et ainsi de suite. En ce qui concerne les rapports de poids pour une poutre secondaire bi-encastree **avec prise en compte du déversement**, les résultats sont repris à la FIGURE 5.10 suivante.

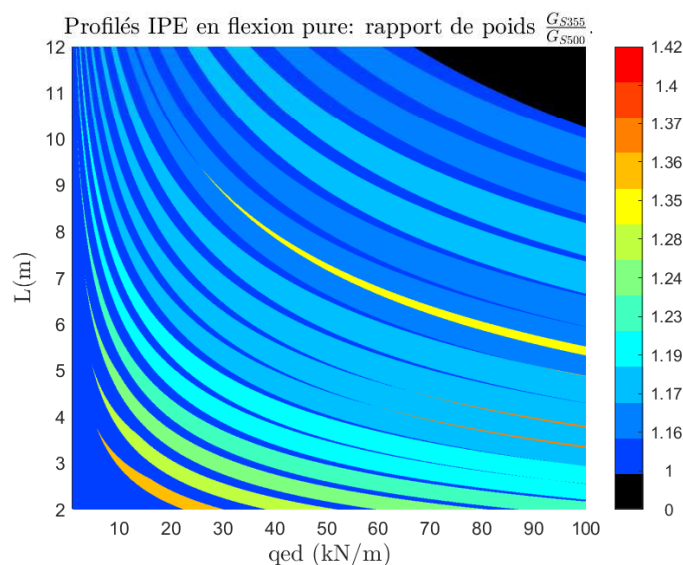


FIGURE 5.10 – Rapport de poids entre les profils requis pour les deux nuances comparées pour une poutre secondaire bi-encastree libre de déverser.

A nouveau, la plupart des franges présentant un intérêt éventuel de la nuance HSS possède des rapports de poids entre les deux profils requis relativement faibles. Cela sous-entend donc que lorsque le coût relatif aura une certaine valeur, le pourcentage du domaine représentant un intérêt pour la nuance S500 chutera brusquement. Le pourcentage du domaine présentant un intérêt de la nuance S500 en fonction du coût relatif considéré est repris à la FIGURE 5.11.

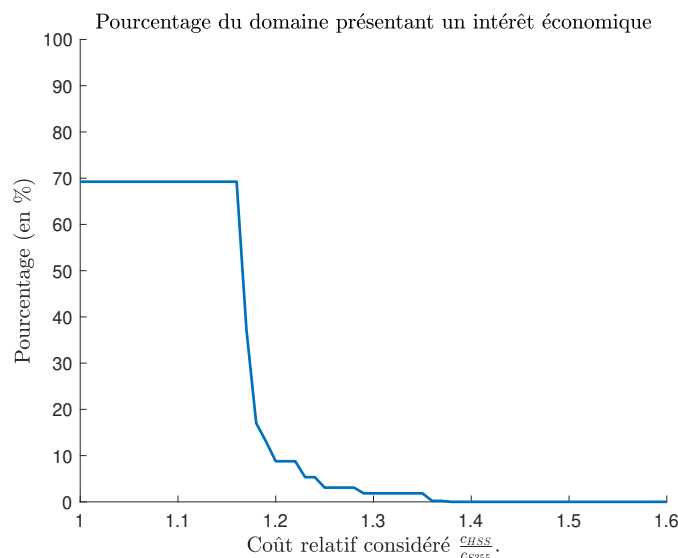


FIGURE 5.11 – Evolution du pourcentage d'intérêt de la nuance HSS en fonction du coût relatif de cette nuance.

Comme cela a été montré dans la section relative aux poutres secondaires bi-encastrées dans le chapitre de l'étude locale, le domaine est gouverné par les ELU dans ce cas-ci. Toute contre-flèche n'aurait donc aucun impact sur les résultats. Cependant, on peut remarquer que le pourcentage initial est de 69.24% et chute à partir de 1.16. En effet, à un coût relatif de 1.17 on a plus que 37.32% ayant un intérêt et à un coût relatif de 1.18 on a plus que 17.04%... En conclusion, bien que les poutres secondaires bi-encastrées présentent plus de zones possibles d'intérêt que les poutres secondaires bi-appuyées, le coût relatif de la nuance HSS (S500) doit être relativement faible pour qu'il existe des domaines significatifs d'intérêt de la nuance HSS (S500).

5.3.2 Poutres primaires

Cette deuxième partie de l'étude économique des éléments en flexion pure se base sur les poutres primaires soumises à un chargement de type ponctuel à l'inverse du chargement uniforme des poutres secondaires.

Bien que les résultats ne vont pas être beaucoup plus probants que ceux obtenus pour les poutres secondaires, ceux-ci vont être représentés afin que l'étude soit menée à bout.

Poutres primaires bi-appuyées

Les rapports de poids entre les deux profilés requis pour les deux nuances comparées dans cas de poutres primaires bi-appuyées **empêchées de déverser** sont repris à la FIGURE 5.12.

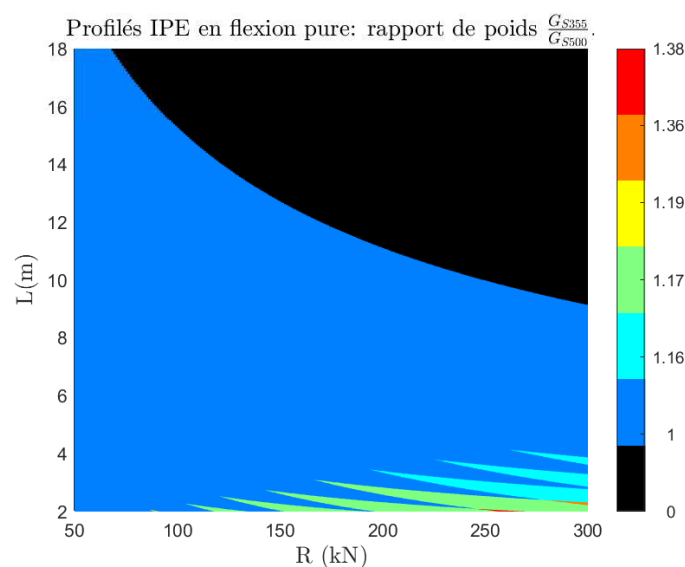


FIGURE 5.12 – Rapport de poids entre les profils requis pour les deux nuances comparées pour une poutre primaire bi-appuyée empêchée de déverser.

Les états limites de service dominant une nouvelle fois la majorité du domaine comme cela a pu être montré au travers de l'étude locale. Peu importe le coût relatif considéré, l'intérêt de la nuance S500 sera donc très limité dans ce cas. De plus, les longueurs pour lesquelles il y a un intérêt potentiel n'ont pas vraiment de sens. Il est rare de voir des poutres primaires de 2m.

En ce qui concerne le cas de poutres primaires bi-encastées **libres de déverser**, les résultats obtenus ne sont pas beaucoup plus probants. Ceux-ci sont représentés à la FIGURE 5.13 suivante.

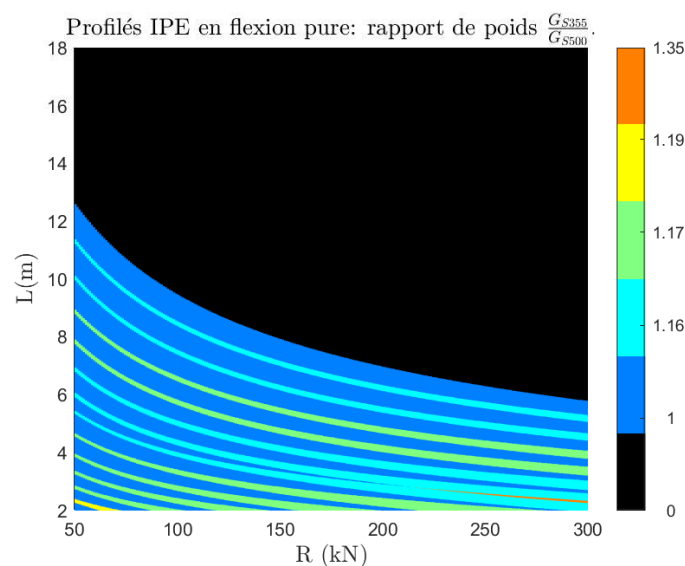


FIGURE 5.13 – Rapport de poids entre les profils requis pour les deux nuances comparées pour une poutre primaire bi-appuyée libre de déverser.

A nouveau, la FIGURE 5.13 illustre le fait que le coût relatif de la nuance HSS S500 doit être inférieur à 1.17 pour qu'il y ait un intérêt économique d'utiliser cette nuance plutôt que la nuance S355.

Poutres primaires bi-encastées

En ce qui concerne les poutres primaires bi-encastées **empêchées de déverser**, les rapports de poids entre les deux profils requis pour les deux nuances comparées sont repris à la FIGURE 5.14.

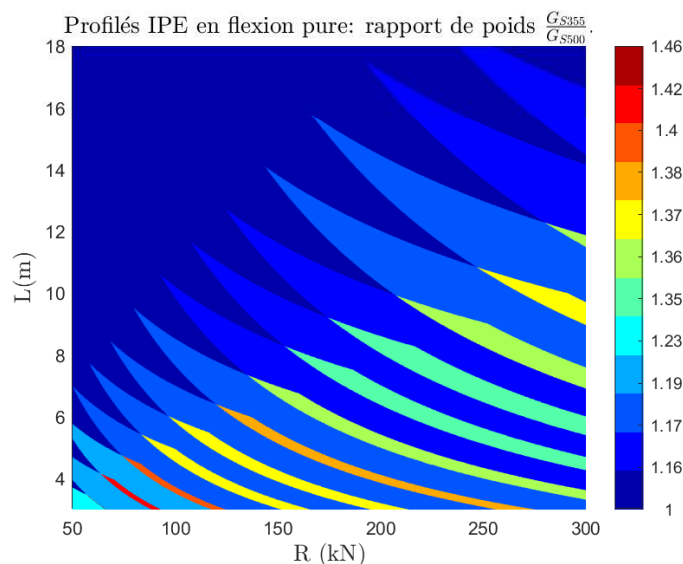


FIGURE 5.14 – Rapport de poids entre les profils requis pour les deux nuances comparées pour une poutre primaire bi-encastée empêchée de déverser.

Ce cas de figure présente une zone beaucoup plus significative dans laquelle les aciers HSS ont un possible intérêt économique plus marqué. Le pourcentage du domaine présentant un intérêt de l'utilisation de la nuance S500 en fonction du coût relatif est néanmoins représenté à la FIGURE 5.15.

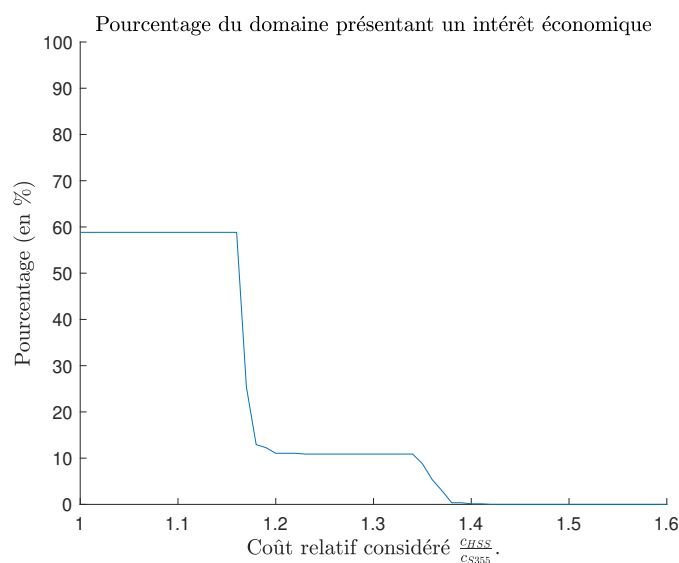


FIGURE 5.15 – Evolution du pourcentage d'intérêt de la nuance HSS en fonction du coût relatif de cette nuance.

Le domaine est partiellement gouverné par les ELS de telle sorte que, même pour le coût re-

latif de la nuance S500 le plus petit possible, le domaine d'intérêt représente 58.83% du domaine total et chute brusquement pour les mêmes coûts relatifs que précédemment.

Le dernier cas qu'il reste à considérer est celui d'une poutre primaire bi-encastée **libre de déverser**, ce dernier cas fournit les rapports de poids repris à la FIGURE 5.16.

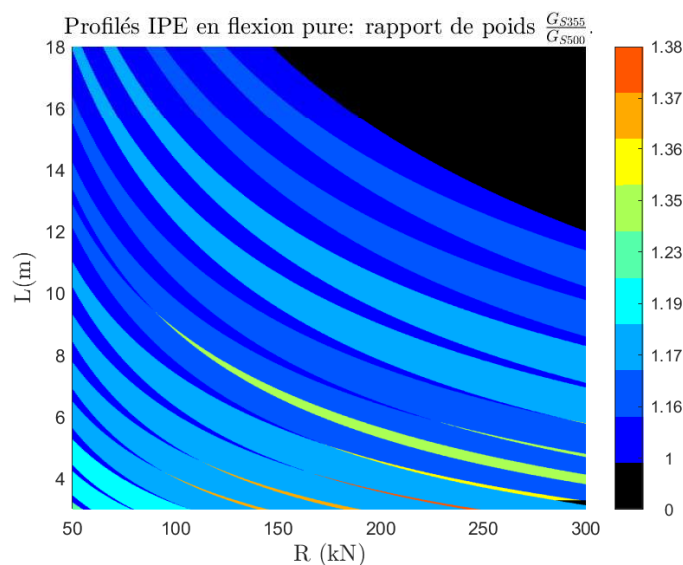


FIGURE 5.16 – Rapport de poids entre les profils requis pour les deux nuances comparées pour une poutre primaire bi-encastée libre de déverser.

Cela semble, au vu de la FIGURE 5.16, être le cas le plus probant. Les zones possédant un rapport de poids entre les deux profils requis (pour les deux nuances comparées) différents de l'unité sont nombreuses. Cependant, le pourcentage du domaine présentant un intérêt de la nuance S500 chute assez rapidement lorsqu'on augmente le coût relatif (FIGURE 5.17). Initialement, pour des coûts relatifs inférieurs à 1.16, le pourcentage du domaine présentant un intérêt de la nuance HSS vaut 59.99%, pour un coût relatif de 1.17 le pourcentage ne vaut plus que 17.45% et seulement 3.59% pour un coût relatif de 1.18.

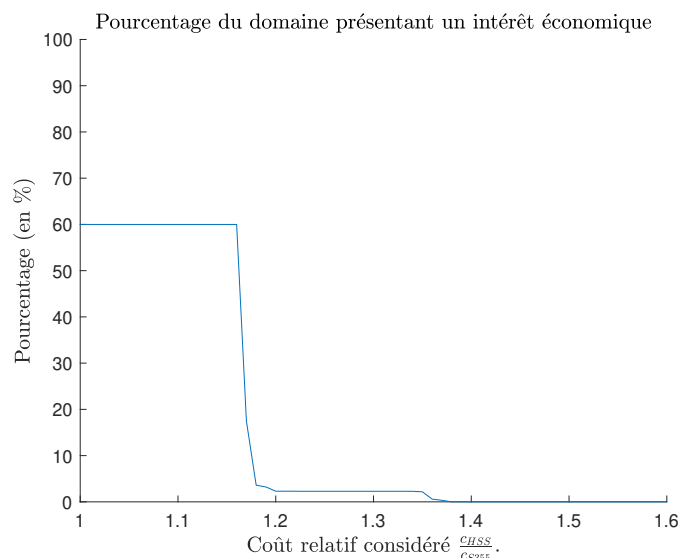


FIGURE 5.17 – Evolution du pourcentage d'intérêt de la nuance HSS en fonction du coût relatif de cette nuance.

En ce qui concerne les poutres primaires, c'est donc le cas qui présente le plus de zones potentielles d'intérêt. Toutefois, afin de maximiser les domaines d'utilisation de la nuance S500, il faudrait que le coût relatif n'excède pas 1.16. Les conclusions sont donc assez semblables à celles obtenues pour les poutres secondaires. Cependant, les portions du domaine présentant le plus d'intérêt de la nuance S500 sont les portions relatives à de faibles longueurs de poutres. Ce qui n'a pas vraiment de sens pour les poutres primaires qui sont, en général, plus longues que les poutres secondaires (voir la FIGURE 3.3 du chapitre méthodologie).

5.3.3 Intérêt du cintrage

Au travers de l'étude économique des éléments en flexion pure, il en ressort que les éléments empêchés de déverser voient leur domaine fortement gouverné par les états limites de service (ELS).

L'objectif de cette dernière étude relative aux éléments en flexion pure est de justifier ou non l'intérêt d'un cintrage, c'est-à-dire d'une contre-flèche initiale de l'élément fléchi afin de s'affranchir partiellement de la dominance des ELS.

Le cintrage consiste à donner une courbure initiale à une poutre de telle sorte qu'elle soit horizontale sous charges permanentes et poids propre. Les flèches de cette poutre ne proviendront donc plus que des charges variables uniquement. Il convient donc de déterminer les proportions de charges permanentes et de charges variables dans les charges uniformes établies au chapitre relatif à la méthodologie du travail. Le pourcentage était approximativement de 60% de charges permanentes contre 40% de charges variables. Il a donc été décidé de conserver ces pourcentages afin de réaliser l'étude.

Les limites entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU pour les

poutres secondaires bi-appuyées et bi-encastées empêchées de déverser sont représentés à la FIGURE 5.18¹.

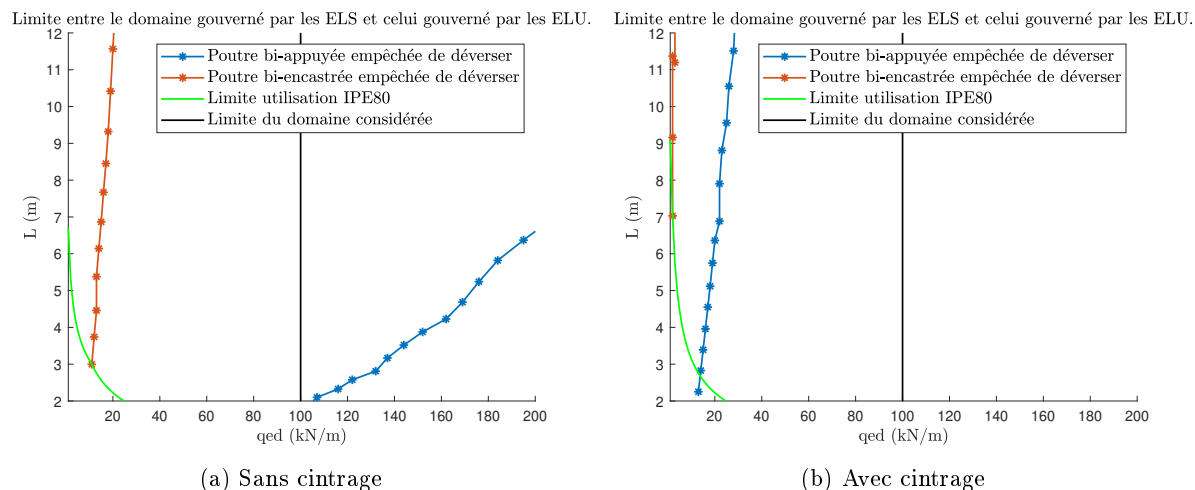


FIGURE 5.18 – Limite entre le domaine gouverné par les ELS et celui gouverné par les ELU pour les poutres secondaires.

Le cintrage initial de la poutre secondaire a donc comme effet que le domaine des poutres secondaires bi-appuyées empêchées de déverser ne soit plus entièrement gouverné par les ELS comme c'était le cas sans cintrage. De façon analogue, le domaine des poutres secondaires bi-encastées empêchées de déverser est complètement gouverné par les ELU lorsque le cintrage est considéré. Ces résultats avec cintrage sont donc positifs puisqu'il a été montré que plus le domaine est gouverné par les ELU plus les aciers HSS ont un intérêt potentiel. Le fait qu'il y ait un intérêt économique ou non dépend alors du coût relatif de cette nuance.

Les rapports de poids pour les poutres secondaires bi-appuyées et bi-encastées sont représentés à la FIGURE 5.19.

1. Pour rappel, le domaine gouverné par les ELS se trouve à gauche de la limite d'utilisation tandis que celui gouverné par les ELU se trouve à droite.

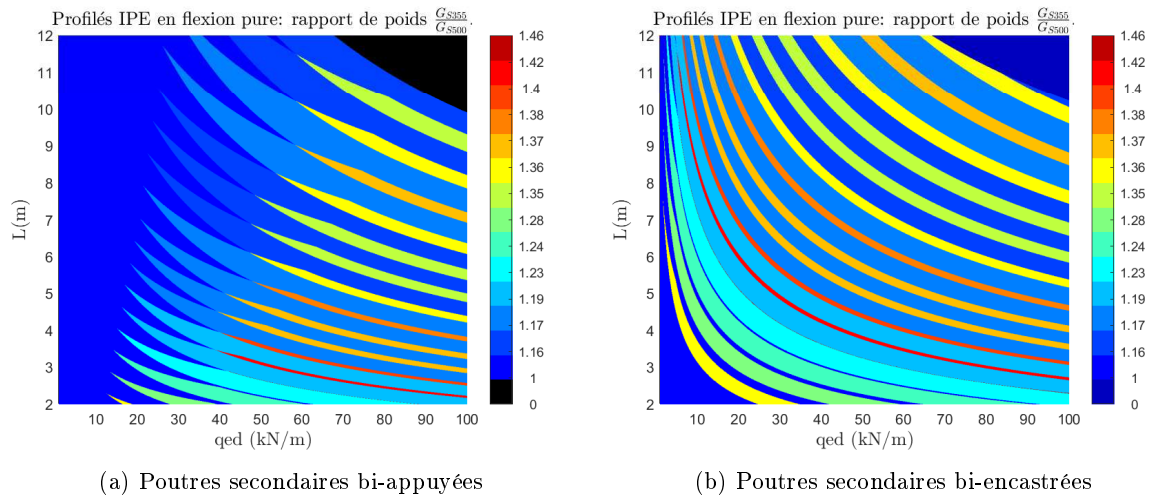
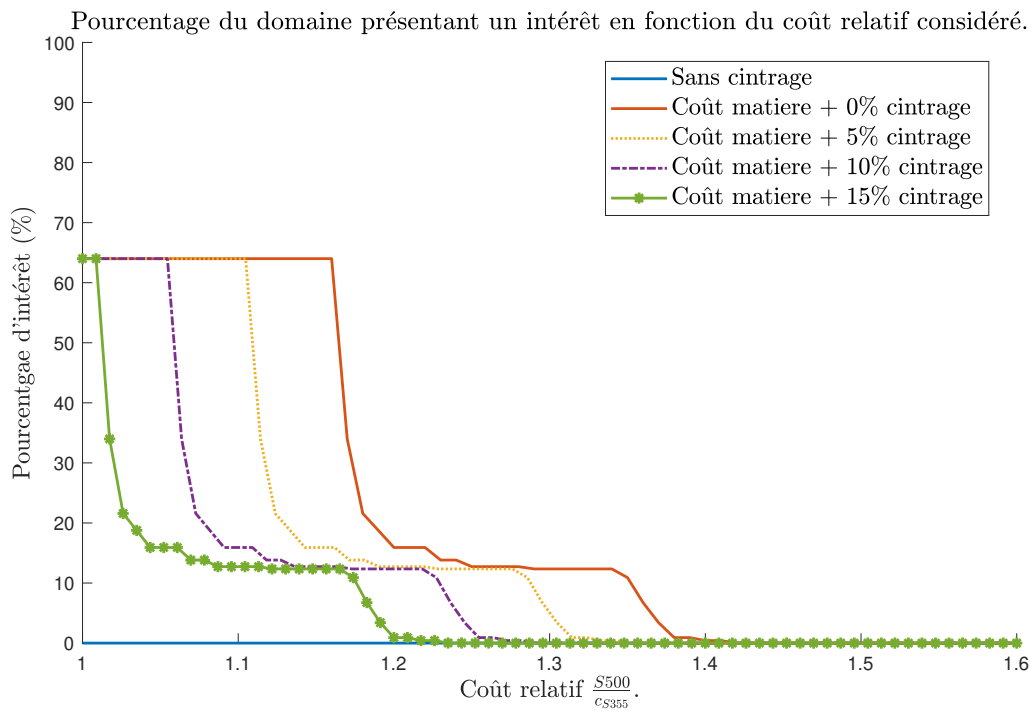
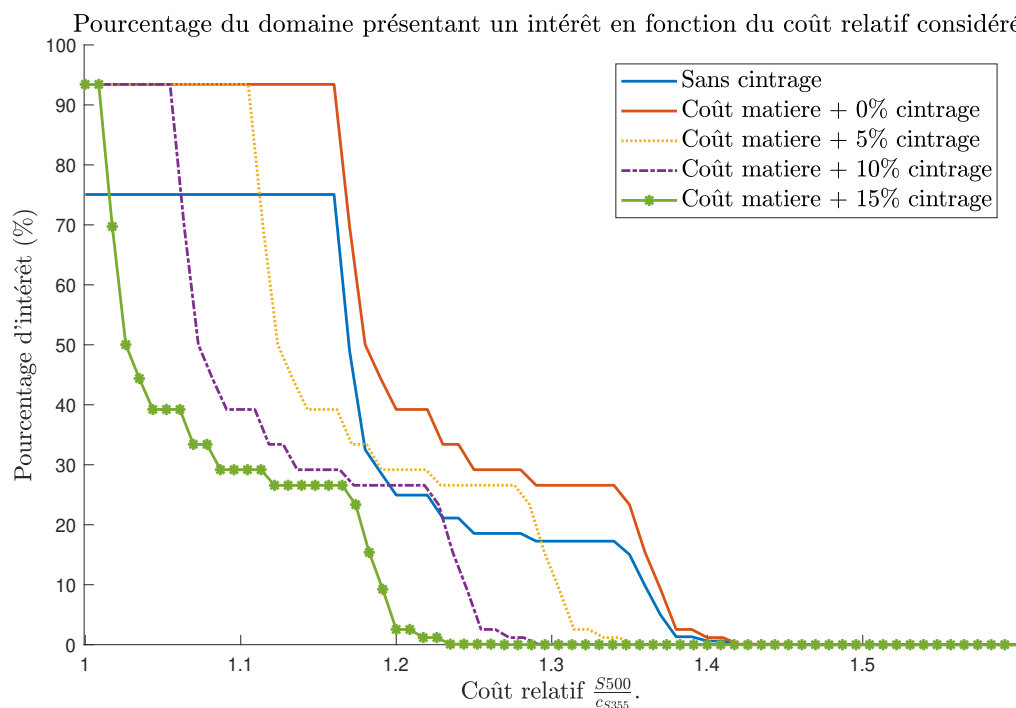


FIGURE 5.19 – Rapport de poids entre les deux profils requis pour des poutres secondaires bi-appuyées ou bi-encastées sans déversement et cintrée initialement.

Afin d'analyser l'influence du coût relatif sur l'intérêt économique de la nuance HSS S500, les pourcentages du domaine présentant un intérêt en fonction du coût relatif de la nuance HSS sont repris à la FIGURE 5.20 en considérant différentes majorations du coût dues à la considération d'un cintrage initial de la poutre. En effet, le cintrage initial d'une poutre a un coût. Afin de se donner une idée de l'influence de celui-ci sur les résultats, des majorations du coût relatif de 5 à 15% vont être considérées.



(a) Poutres secondaires bi-appuyées



(b) Poutres secondaires bi-encastées

FIGURE 5.20 – Evolution du pourcentage d'intérêt de la nuance HSS en fonction du coût relatif de cette nuance avec ou sans cintrage.

La FIGURE 5.20 (a) illustre bien le fait que cintrer la poutre secondaire bi-appuyée permet de faire apparaître des zones dans lesquelles la nuance S500 a un intérêt économique ce qui n'était pas le cas sans le cintrage. Cependant, le pourcentage maximum du domaine présentant un intérêt de la nuance S500 est de 64%. De plus, le coût additionnel engendré par le cintrage a pour effet de diminuer drastiquement l'intérêt. En effet, si le cintrage augmente de 15% le coût de la matière, le pourcentage d'intérêt chute dès que le coût relatif de la nuance S500 est de 1.01. A l'inverse, le cas où le coût additionnel engendré par le cintrage de la poutre est nul, cela a pour effet qu'il y ait 64% du domaine présentant un intérêt jusqu'à un coût relatif de 1.16 mais ce n'est pas réaliste car le cintrage engendrera toujours un coût additionnel. En ce qui concerne les cas intermédiaires, le cas où le cintrage engendre une majoration du coût de la matière de 5%, le domaine présentant 64% d'intérêt est valable jusqu'à un coût relatif de la nuance S500 de 1.105.

En ce qui concerne la FIGURE 5.20 (b), les poutres secondaires bi-encastées présentaient déjà des zones d'intérêt de la nuance S500 sans le cintrage à la différence des poutres secondaires bi-appuyées. Il convient donc de comparer les cas avec et sans cintrage. Le cas où le cintrage entraîne une majoration du coût de la matière de 15%, présente 93.42% d'intérêt pour des coûts relatifs de la nuance S500 inférieurs à 1.01 et présente même moins d'intérêt que le cas sans cintrage à partir d'un coût relatif de 1.017. A moins que le coût relatif de la nuance S500 soit très bas, ce cas semble donc inintéressant. Le cas où le coût additionnel du cintrage est nul, est plus intéressant mais n'est pas réaliste comme expliqué précédemment. Pour ce qui est des majorations du coût de la matière de 5% et 10%, les intervalles de coûts relatifs pour lesquels

l'intérêt de la nuance S500 couvre 93.42 % du domaine sont plus étendus et les pourcentages du domaine sont d'autant plus grands que la majoration de coût engendrée par le cintrage est faible.

Etant donné que les raisonnements seraient totalement semblables pour les poutres primaires empêchées de déverser, ces dernières n'ont pas été explicitées plus en détail. L'intérêt du cintrage est donc dépendant du coût additionnel engendré par celui-ci et du coût relatif de la nuance HSS considérée. Cette étude a pu montrer qu'il existe même des intervalles de coûts relatifs pour lesquels le cas sans cintrage présente plus de zones d'intérêt de la nuance HSS que le cas avec cintrage. Les FIGURES 5.20 (a) et (b) permettent donc au sidérurgiste de savoir se fixer un coût relatif en prenant ou non en compte un cintrage initial.

5.4 Eléments comprimés-fléchis

Parallèlement à ce qui a été fait pour l'étude locale dans ce travail, cette dernière partie de l'étude économique consiste en l'étude de l'influence du coût relatif de la nuance HSS sur les résultats obtenus pour des éléments comprimés-fléchis.

A nouveau les trois cas différents d'éléments comprimés fléchis vont être considérés et seule la nuance S500 va être étudiée. Il est à noter que les diagrammes de rapports de poids pour les autres nuances HSS sont repris dans l'annexe D.

5.4.1 Flambement dans le plan et déversement empêché

Les différents rapports de poids entre les deux profils requis pour le cas d'un élément comprimé-fléchi HEA bi-appuyé dont le flambement est libre dans le plan et le déversement est empêché sont repris à la FIGURE 5.21. Cette FIGURE reprend également le pourcentage du domaine présentant un intérêt de la nuance S500 en fonction du coût relatif de cette nuance HSS.

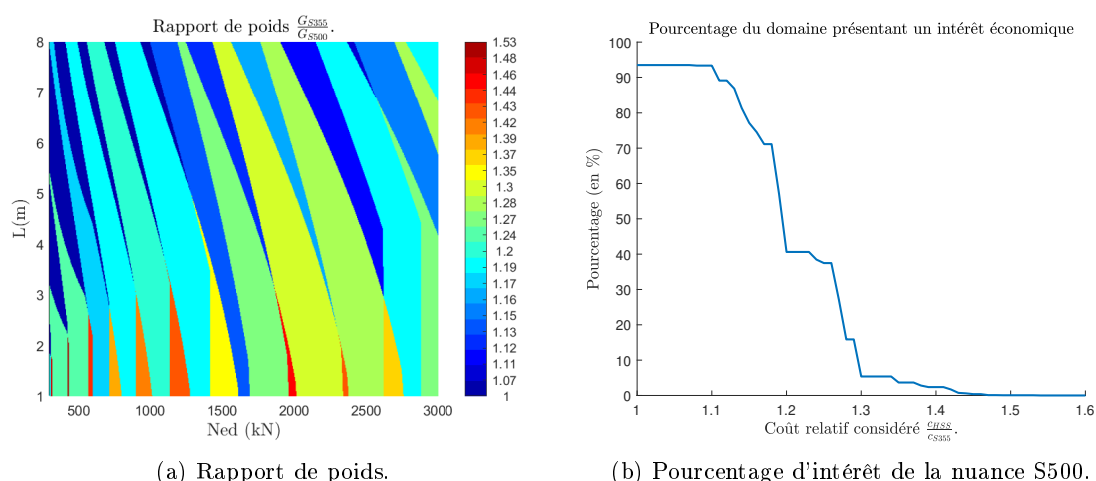


FIGURE 5.21 – Rapport de poids entre les deux profils requis et pourcentage d'intérêt en fonction du coût relatif pour un élément comprimé-fléchi (flambement plan et sans déversement).

Comme illustré sur la FIGURE 5.21 (b), l'évolution du pourcentage d'intérêt de la nuance

HSS S500 en fonction du coût relatif associé à cette nuance est relativement faible. L'intervalle de coûts relatifs dans lequel le pourcentage du domaine présentant un intérêt est significatif est $[1.01 \ 1.3]$. En effet, au delà d'un coût relatif de la nuance HSS de 1.3, l'intérêt de la nuance S500 sera fortement limité à de faibles zones du domaine.

5.4.2 Flambement dans l'espace et déversement empêché

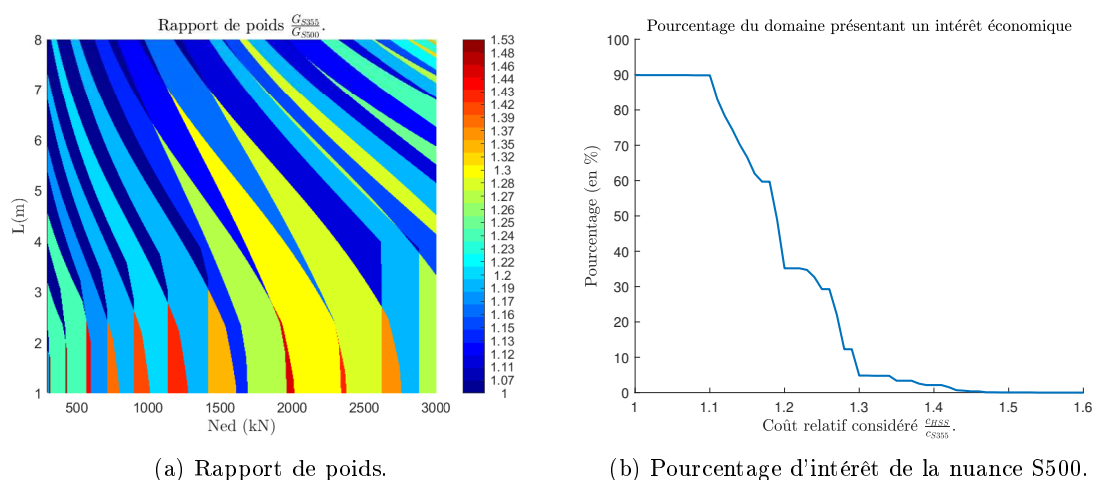


FIGURE 5.22 – Rapport de poids entre les deux profils requis et pourcentage d'intérêt en fonction du coût relatif pour un élément comprimé-fléchi (flambement dans l'espace et sans déversement).

Ce deuxième cas, de par la prise en compte du flambement d'axe faible, devrait posséder des pourcentages d'intérêt de la nuance HSS réduit. Cependant, les critères de flèches contrebalancent puisque ceux-ci sont moins prédominants dans ce cas ci pour les raisons abordées dans l'étude locale de ces éléments. En ce qui concerne l'évolution du pourcentage du domaine présentant un intérêt de la nuance S500, celle-ci est relativement semblable à celle du premier cas d'éléments comprimé-fléchis ci-dessus.

5.4.3 Flambement dans l'espace et déversement libre

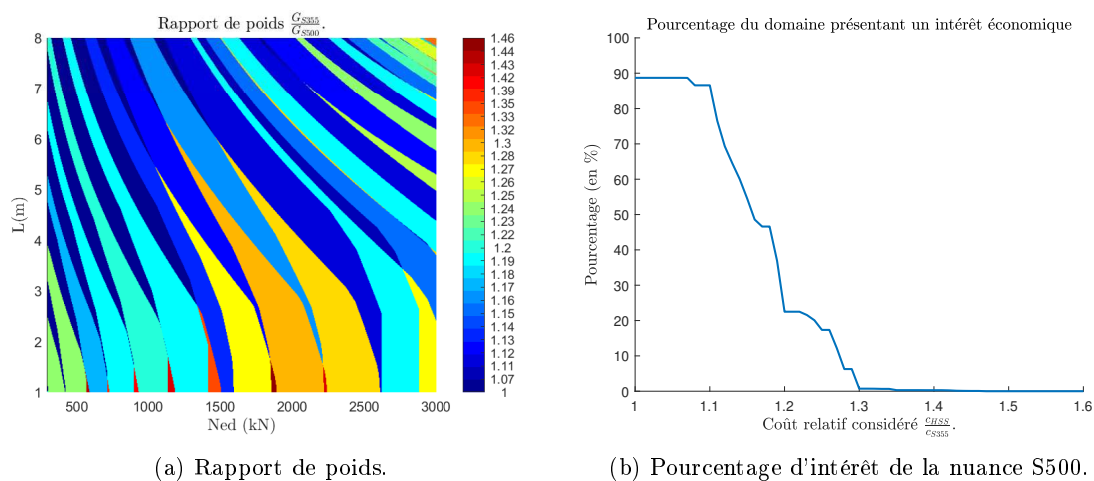


FIGURE 5.23 – Rapport de poids entre les deux profilés requis et pourcentage d'intérêt en fonction du coût relatif pour un élément comprimé-fléchi (flambement dans l'espace et avec déversement).

La prise en compte du déversement entraîne une légère diminution du pourcentage d'intérêt de la nuance S500 mais l'intervalle de coûts relatifs dans lequel les pourcentages d'intérêt de la nuance S500 restent significatifs est le même que pour les deux cas précédemment considérés.

En conclusion, les éléments comprimés-fléchis, pour le domaine et les paramètres qui ont été fixés, présentent de larges domaines d'intérêt. Cela est dû notamment au fait que les ELS gouvernent très peu le dimensionnement comparé aux éléments en flexion pure. Pour rappel, les différents diagrammes de rapports de poids pour différentes combinaisons de paramètres sont repris dans l'annexe D.

Chapitre 6

Conclusions

La problématique abordée dans ce travail de fin d'étude était de fournir des aides au concepteur afin qu'il puisse déterminer si la nuance HSS qu'il voudrait utiliser a un intérêt économique ou non. Au travers de ce travail, deux méthodes ont été élaborées afin de déterminer l'intérêt économique d'une nuance HSS, à savoir :

- **Méthode 1** : Méthode permettant au concepteur de déterminer graphiquement ou numériquement les résultats des designs pour les deux nuances comparées. Le concepteur connaissant les profils laminés requis ainsi que le coût relatif de la nuance HSS, pourra ainsi justifier ou non de l'intérêt économique de cette nuance HSS.
- **Méthode 2** : Méthode permettant de connaître le rapport de poids entre les deux profils laminés requis pour les deux nuances comparées dans l'entièreté du domaine. Connaissant le coût relatif de la nuance HSS, le concepteur pourra déterminer directement si cette nuance a un intérêt économique ou non. Cette méthode semble donc la plus aboutie, son seul point négatif étant que le concepteur ne connaît pas le profilé requis, il devra donc quand même dimensionner l'élément par la suite.

Les figures représentant les rapports de poids (entre les profils requis) dans le domaine qui a été étudié sont reprises pour différentes combinaisons de paramètres dans les annexes de ce travail. L'annexe A est relative aux éléments tendus, l'annexe B aux éléments comprimés, l'annexe C aux éléments en flexion pure et l'annexe D aux éléments comprimés-fléchis. Pour les colonnes, seules les gammes de profils HEA et HEB ont été considérées puisque c'est celles présentant le plus d'intérêt dans le domaine étudié. Le critère de flèches, quant-à-lui, a été fixé à $L/300$.

Diverses conclusions des études locales et économiques peuvent également être rappelées :

- Un élément soumis à un effort axial non-excentré possède des larges zones d'intérêt au delà de la résistance plastique du premier profilé (en acier RS) de la gamme comparée pour autant que le flambement ne soit pas pris en compte (cas des éléments en traction ou en compression pure empêché de flamber). Si le flambement est pris en compte, le gain de matière engendré par le passage d'une nuance RS à une nuance HSS est plus faible

puisque plus l'élancement est important plus la section requise est la même peu importe la nuance considérée. Néanmoins, malgré la prise en compte des instabilités, des zones significatives présentant un intérêt économique de la nuance HSS subsistent.

- Le passage d'une nuance HSS à une autre a tendance à restreindre le domaine d'intérêt. En effet, dans de nombreux cas, le gain de résistance ne compense pas l'augmentation du coût relatif de cette nuance HSS.
- La prise en compte des instabilités selon l'axe faible a un effet néfaste sur l'intérêt des aciers HSS.
- Un élément soumis à de la flexion pure fournit des domaines d'intérêt de la nuance HSS relativement restreints. Cela s'explique par la présence de limite de flèches (ELS) dans ce cas. Malgré le fait que la prise en compte du déversement rajoute une condition dans le dimensionnement, cela a pour effet de rendre les ELU plus dimensionnants et donc d'amener des zones possibles d'intérêt de la nuance HSS considérée. L'utilisation d'une contre-flèche a également pour effet d'accroître les zones possibles d'intérêt. Cependant, le cintrage entraîne des majorations du coût ce qui limite l'intérêt comme cela a pu être discuté dans l'étude économique.
- Plus l'excentricité de la charge axiale d'un élément comprimé-fléchi est importante, moins la nuance HSS a d'intérêt dans le domaine considéré.

Le domaine, pour lequel l'intérêt économique des aciers HSS a été étudié, a été fixé dans le chapitre relatif à la méthodologie. Le choix de l'intervalle de charges considéré s'applique pour des bâtiments conformément au projet SECHALO. Mis à part le choix de la nuance d'acier, certaines gammes de profilés sont donc privilégiées plutôt que d'autres en fonction de l'intervalle de charges considéré. L'idée serait d'étendre l'intervalle de charges à l'infini et de déterminer non pas uniquement l'intérêt d'une nuance HSS mais quelles sont la gamme de profilés laminés et la nuance les plus appropriées pour l'entièreté du domaine.

Enfin, ce travail s'est limité à l'étude locale de l'intérêt des profilés laminés à haute limite d'élasticité dans la construction métallique. Une perspective serait donc d'utiliser ces méthodes de détermination d'intérêt d'une nuance HSS pour des structures telles que des portiques ou des treillis (étude globale de l'intérêt économique). D'autres perspectives de ce travail seraient de réaliser des études analogues à celle réalisée dans ce travail pour des profilés laminés partiellement ou totalement enrobés de béton afin d'investiguer la construction mixte également. Une étude des colonnes métalliques carrées remplies ou non de béton analogue à celle des tubes à haute limite d'élasticité préalablement réalisée à l'Université de Liège peut être également envisagée.

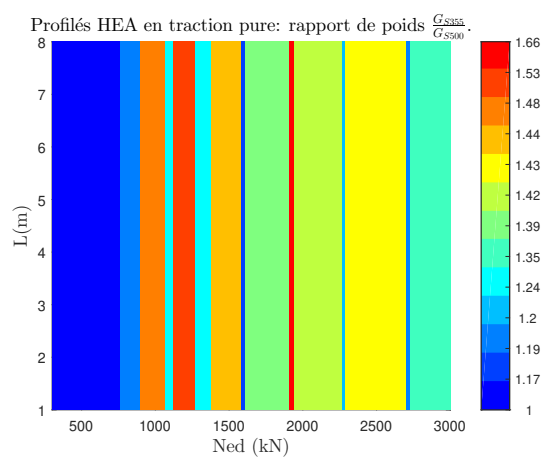
Bibliographie

- [1] EN 1993-1-1. *Eurocode 3 - Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments*, octobre 2005.
- [2] ArcelorMittal. https://sections.arcelormittal.com/products_and_solutions/products_range/EN?expand=520.
- [3] ArcelorMittal. https://constructalia.arcelormittal.com/fr/plus_d_actus/articles/guides-de-conception-pour-les-btiments-en-acier.
- [4] PIKS et ASCEM ArcelorMittal, CTICM. *BÂTIMENTS EN ACIER EN EUROPE, Bâtiments en acier à simple rez-dechaussée, Partie 4 : Conception et calcul des portiques*. http://sections.arcelormittal.com/fileadmin/redaction/4-Library/4-SBE/FR/SSB04_Conception_et_calcul_des_portiques.pdf.
- [5] N. Baddoo and D. Brown (NSC). *High Strength Steel*, September 2015. <http://www.newsteelconstruction.com/wp/wp-content/uploads/TechPaper/TechNSCSept15.pdf>.
- [6] Aurel Stratan-Cristian Vulcu Dan Dubina, Raffaele Landolfo. *Application of High Strength Steels in Seismic Resistant Structures.*, June 2013.
- [7] G. Sedlacek et al. *Use of high-strength steel S460*, EUR 20104 EN, 2002.
- [8] T. Kretz et al. *Les aciers à Haute Limite d'Elasticité*, octobre 2012.
- [9] J.-P. Jaspart. *Cours de calcul d'éléments métalliques*, Université de Liège 2015-2016.
- [10] Leroy Gardner (Imperial College London). *Designing HSS structures : Eurocode rules and practical guidance*. <http://news-sci.com/wp-content/uploads/2015/07/6-hillong-leroy-gardner.pdf>.
- [11] Mladen LUKIĆ. *Etat de l'art sur la conception et le calcul des éléments en acier HLE*.
- [12] prEN 1993-1-1. *Eurocode 3 - Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments*, June 2018.
- [13] J-F Demonceau R. Maquoi, J.-P. JASPART. *Eléments de construction mixte*, Université de Liège 2012-2013.
- [14] J.F. Demonceau & B. Rossi V.L. Hoang. *Use of high strength steel tubular columns in structures : Economic study*.

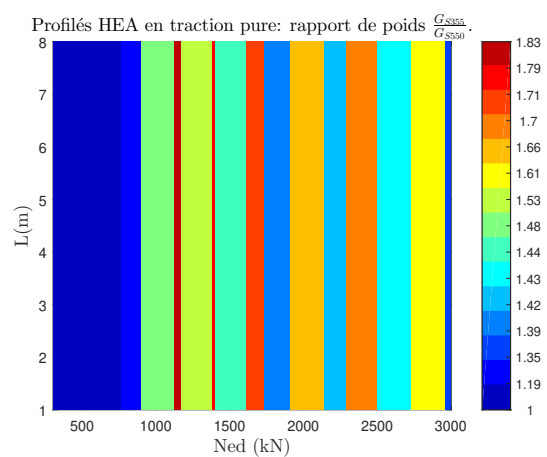
Annexe A

Eléments tendus

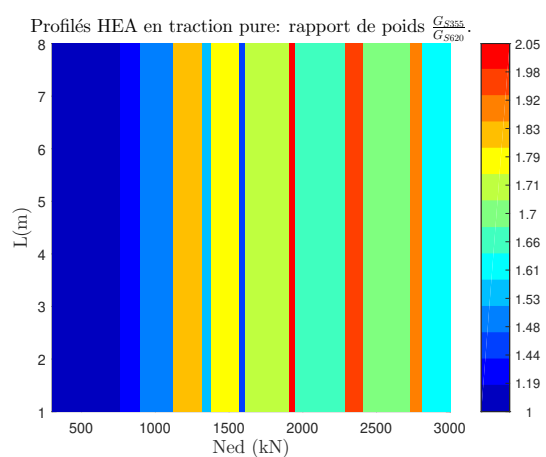
Profilés HEA



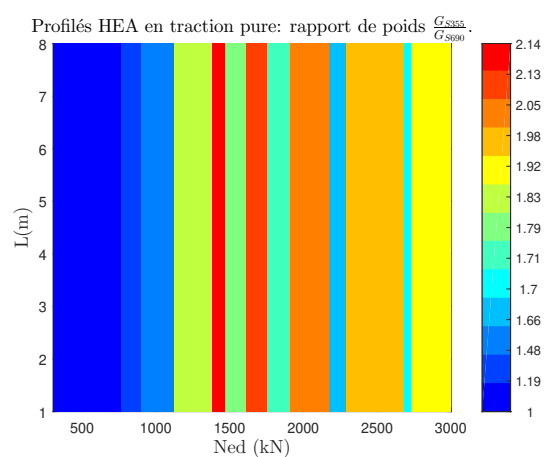
(a) Profilés HEA S500



(b) Profilés HEA S550

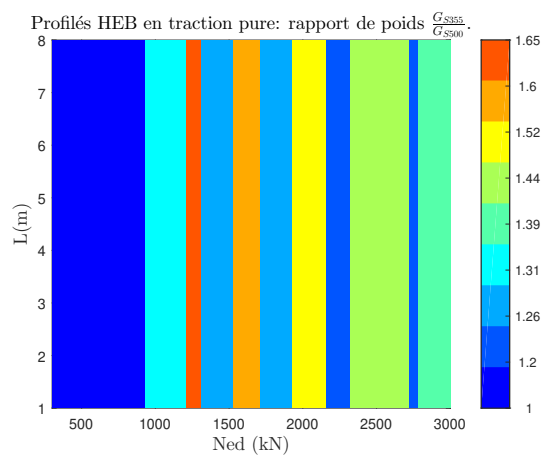


(c) Profilés HEA S620

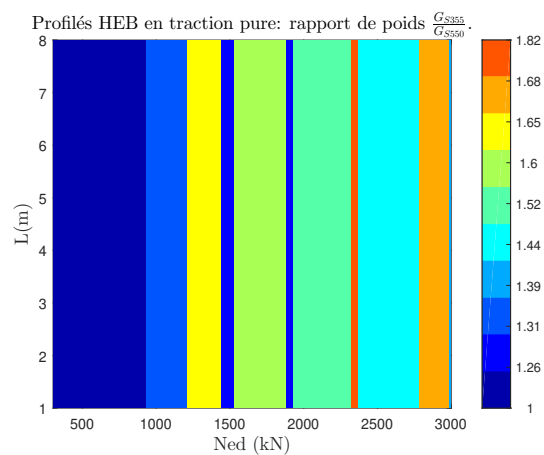


(d) Profilés HEA S690

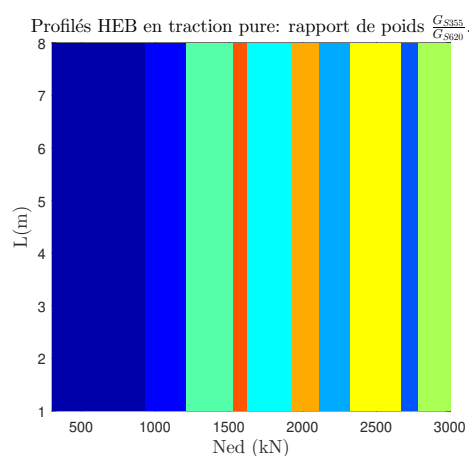
Profils HEB



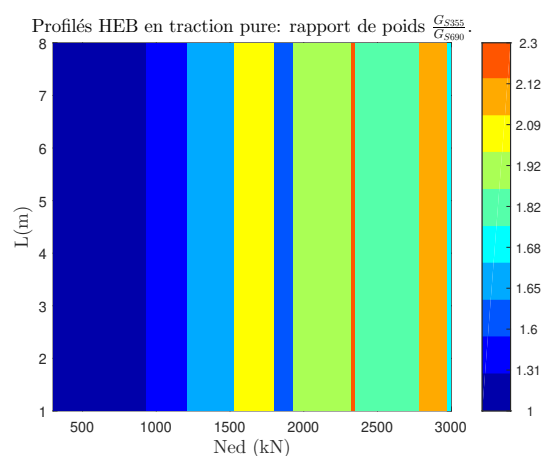
(a) Profils HEB S500



(b) Profils HEB S550



(c) Profils HEB S620



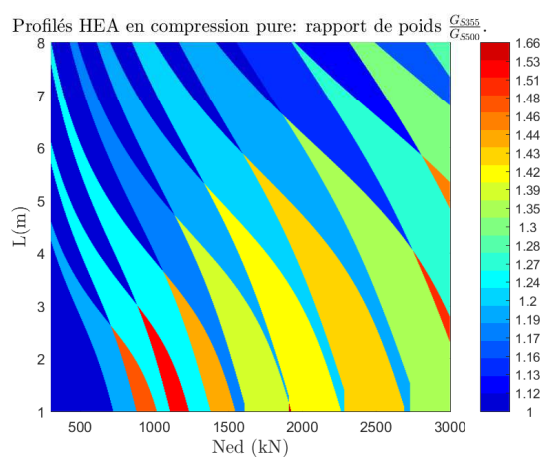
(d) Profils HEB S690

Annexe B

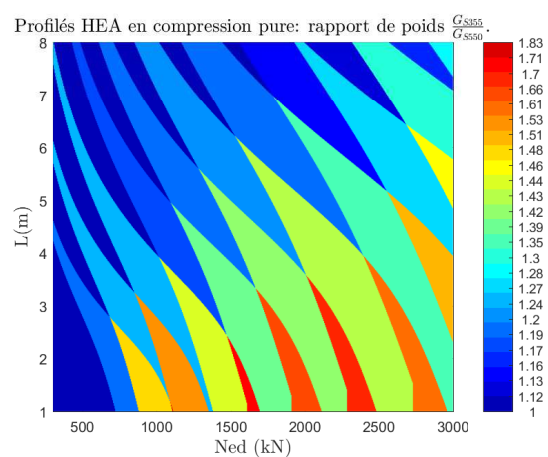
Eléments comprimés

Profilés HEA bi-appuyés

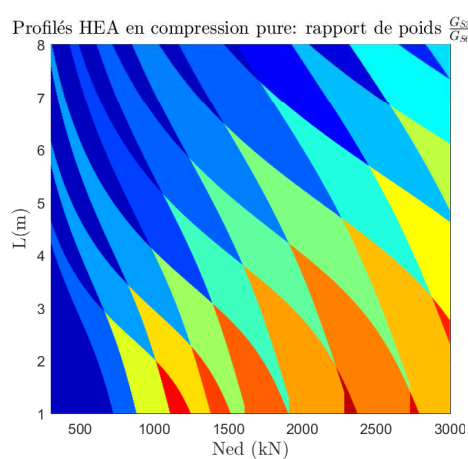
Flambement toujours considéré selon l'axe fort



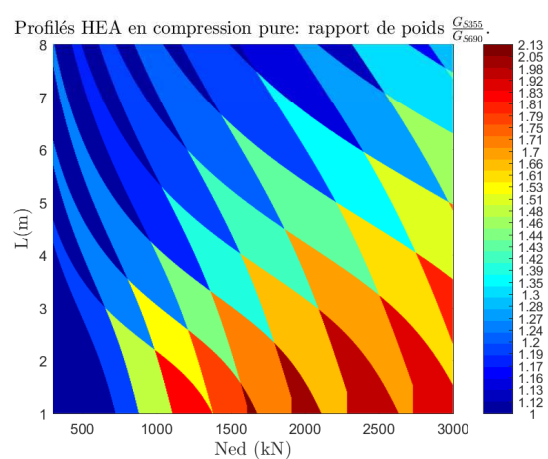
(a) Profilés HEA S500



(b) Profilés HEA S550

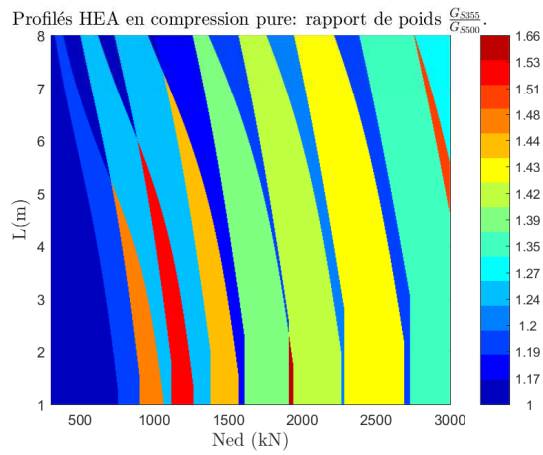


(c) Profilés HEA S620

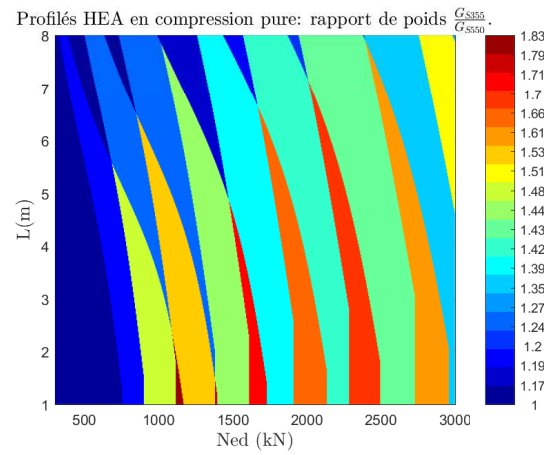


(d) Profilés HEA S690

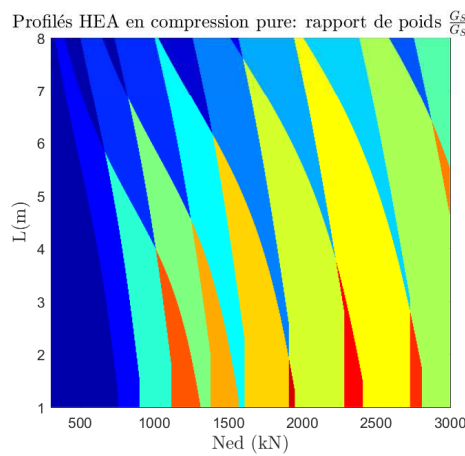
Profils HEA bi-encastrés



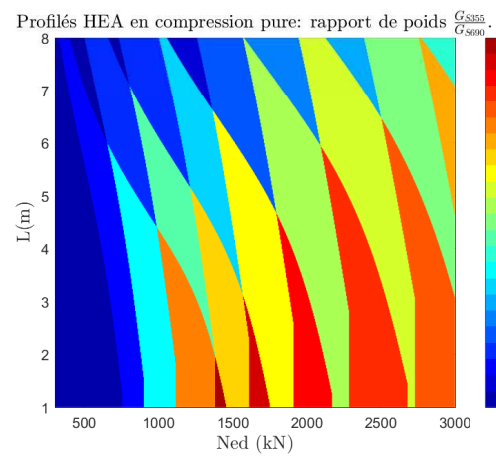
(a) Profils HEA S500



(b) Profils HEA S550

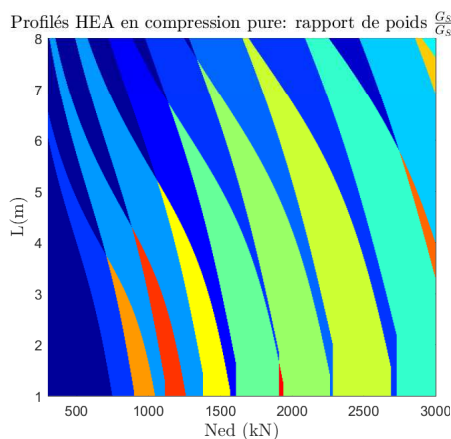


(c) Profils HEA S620

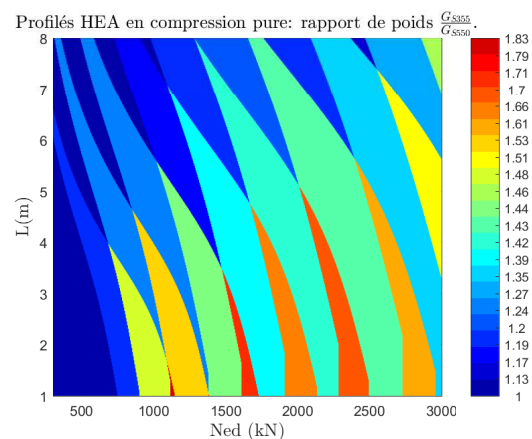


(d) Profils HEA S690

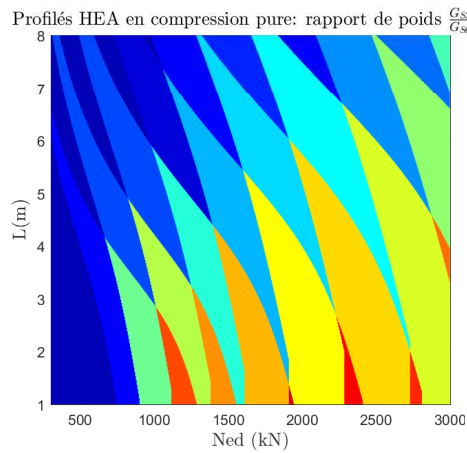
Profils HEA appuyés-encastrés



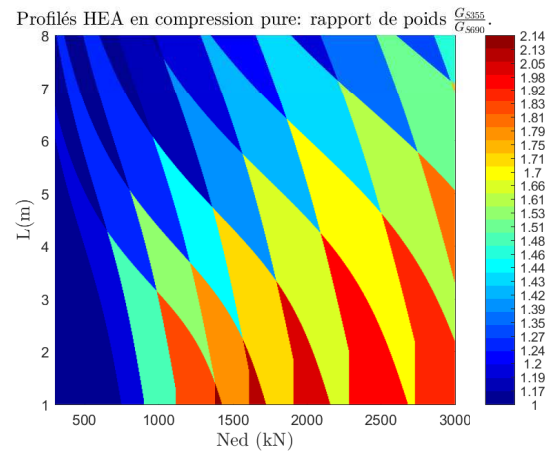
(a) Profils HEA S500



(b) Profils HEA S550

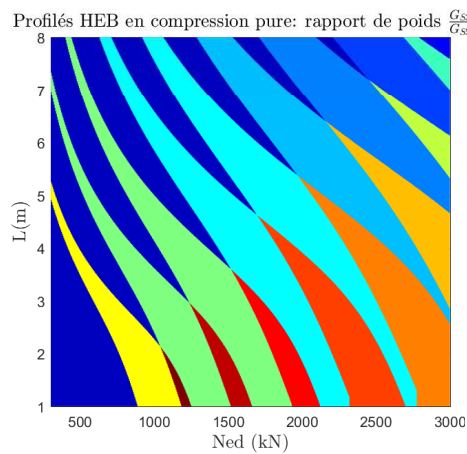


(c) Profils HEA S620

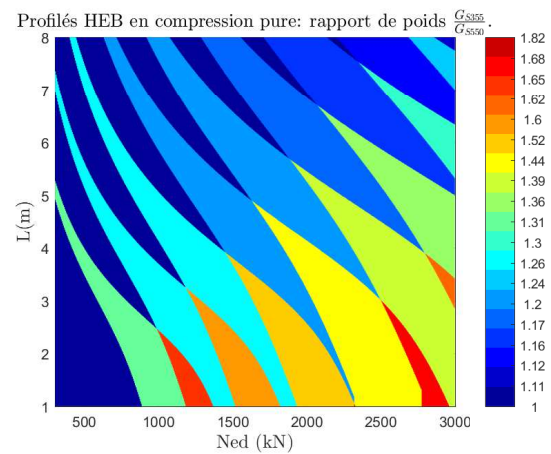


(d) Profils HEA S690

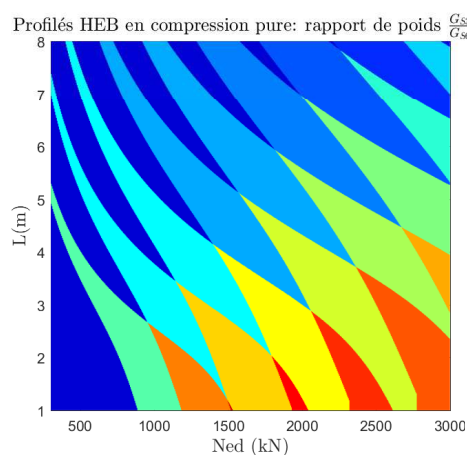
Profils HEB bi-appuyés



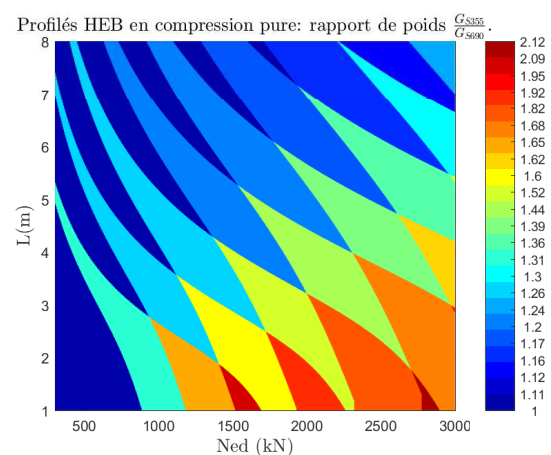
(a) Profils HEB S500



(b) Profils HEB S550

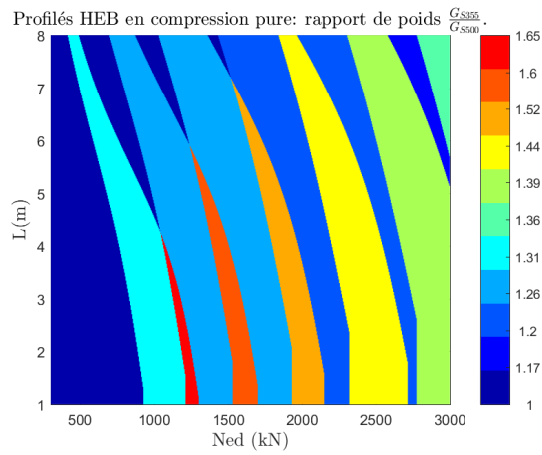


(c) Profils HEB S620

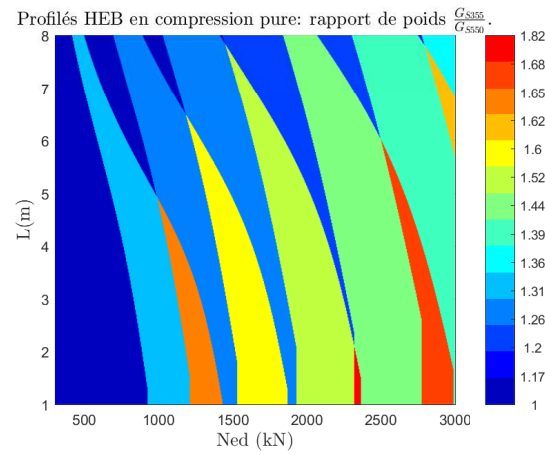


(d) Profils HEB S690

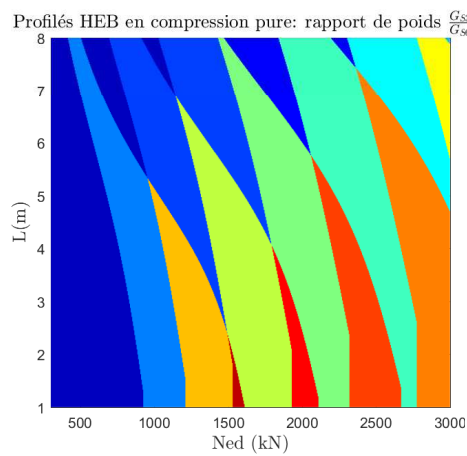
Profils HEB bi-encastrés



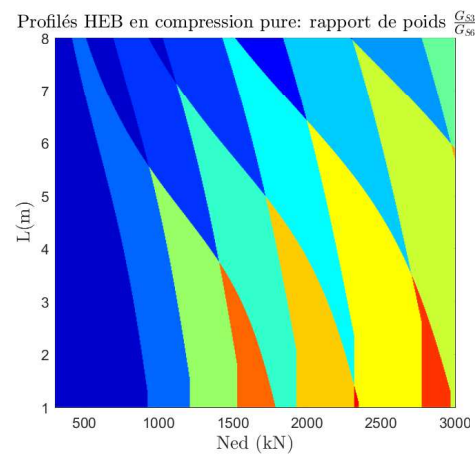
(a) Profils HEB S500



(b) Profils HEB S550

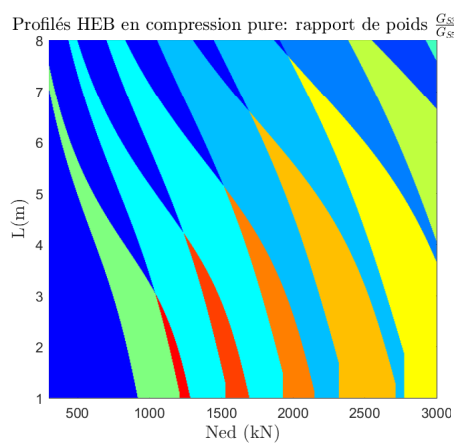


(c) Profils HEB S620

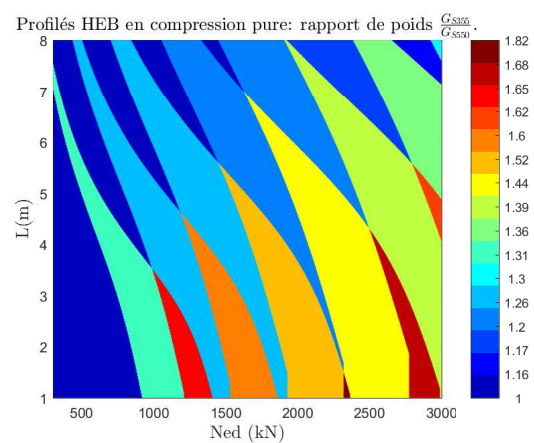


(d) Profils HEB S690

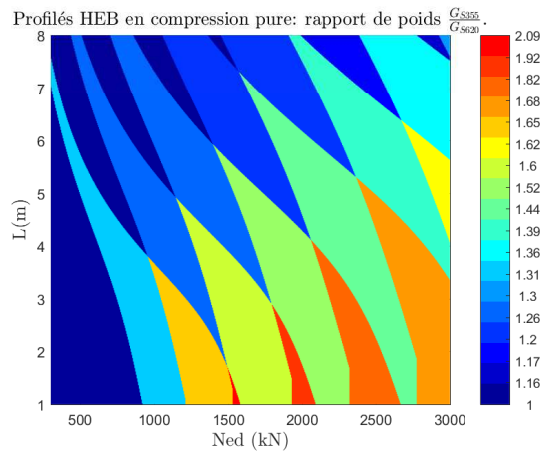
Profils HEB appuyés-encastrés



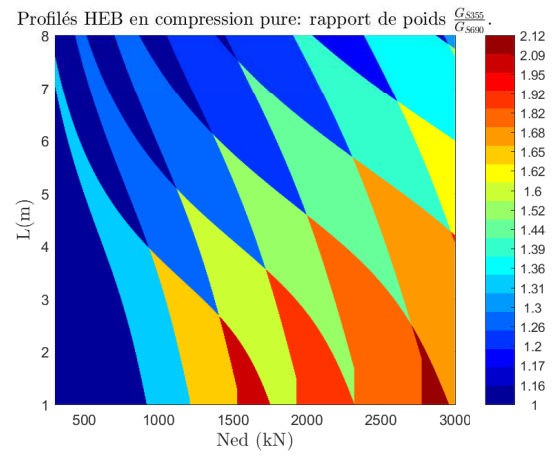
(a) Profils HEB S500



(b) Profils HEB S550



(c) Profils HEB S620



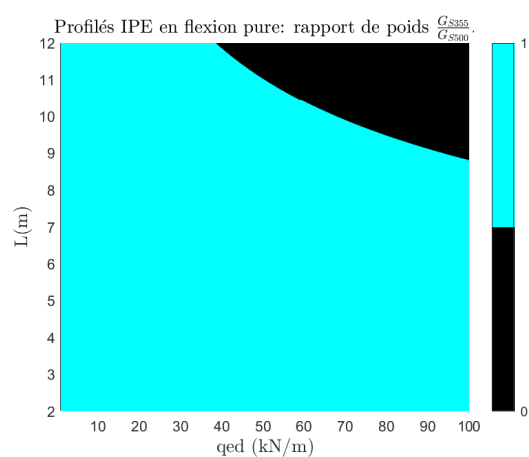
(d) Profils HEB S690

Annexe C

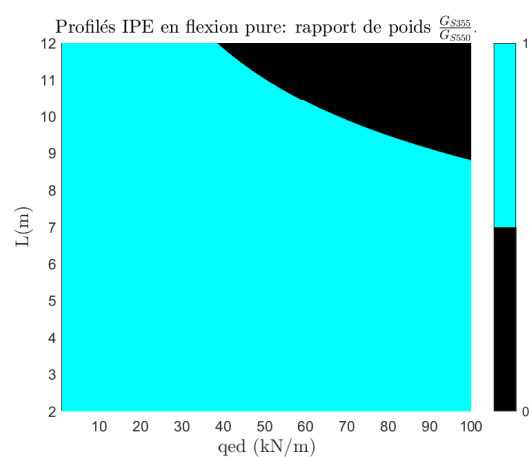
Eléments fléchis

Hypothèse réalisée : critère de flèches fixé à $L/300$.

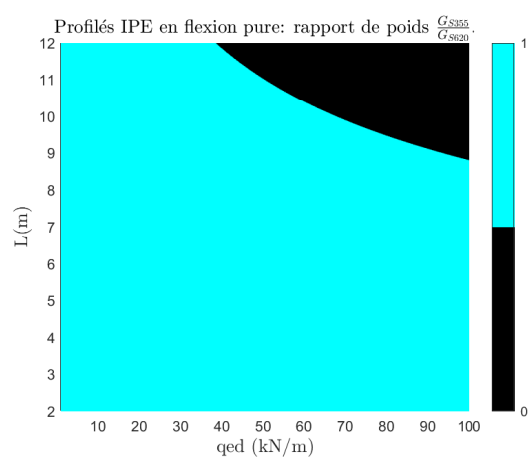
C.1 Poutres secondaires bi-appuyées



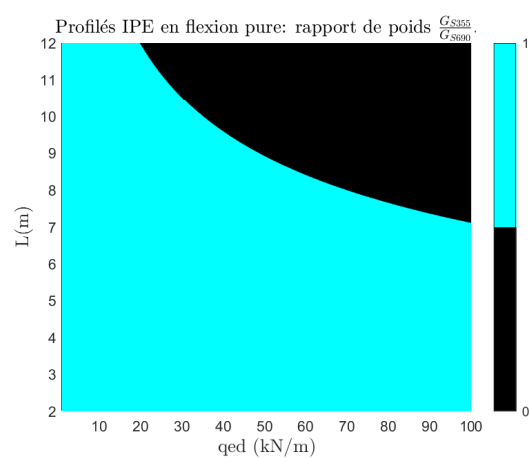
(a) Profils IPE S500 sans déversement



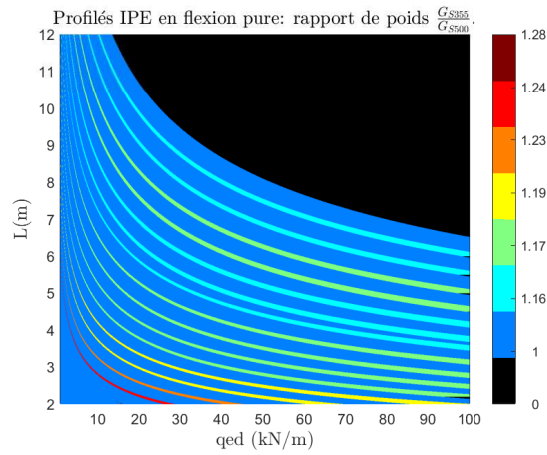
(b) Profils IPE S550 sans déversement



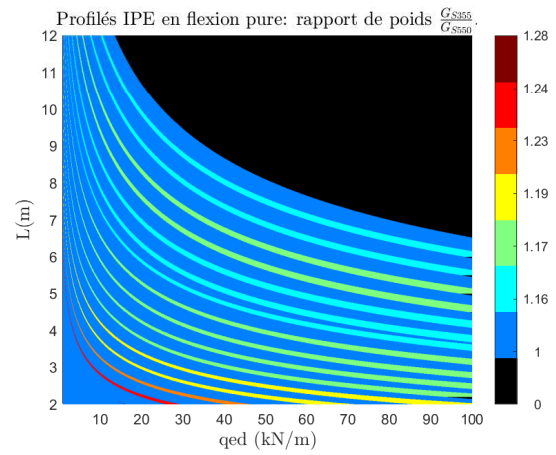
(c) Profils IPE S620 sans déversement



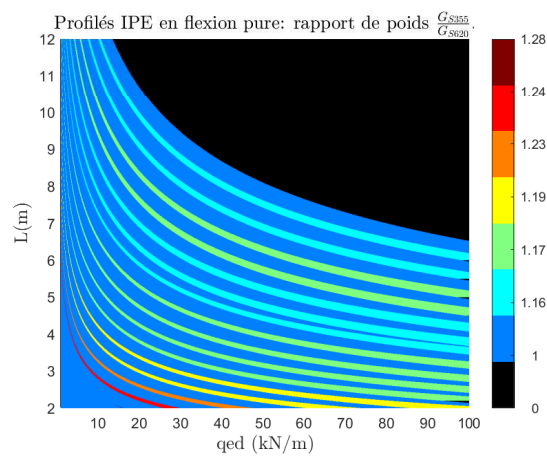
(d) Profils IPE S690 sans déversement



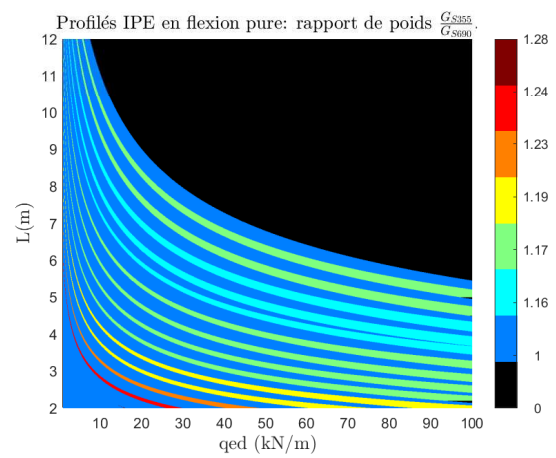
(a) Profils IPE S500 avec déversement



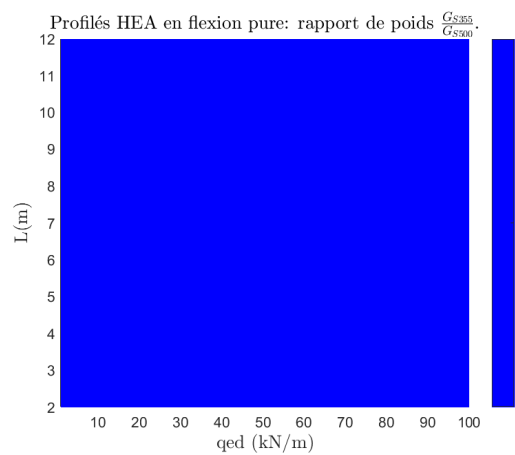
(b) Profils IPE S550 avec déversement



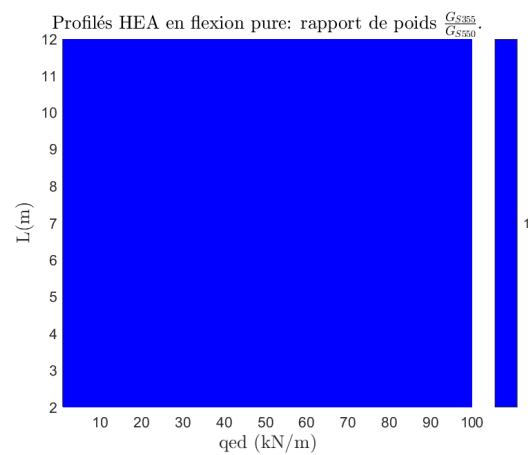
(c) Profils IPE S620 avec déversement



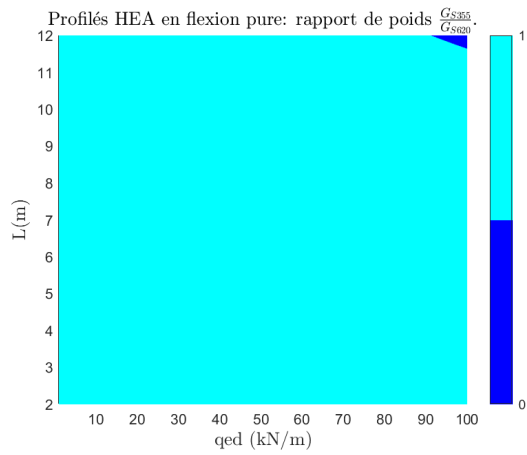
(d) Profils IPE S690 avec déversement



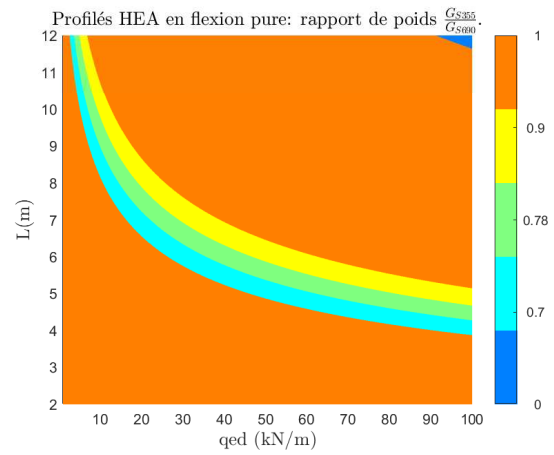
(a) Profils HEA S500 sans déversement



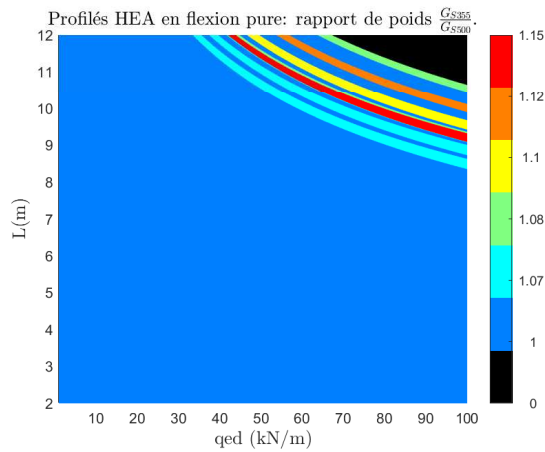
(b) Profils HEA S550 sans déversement



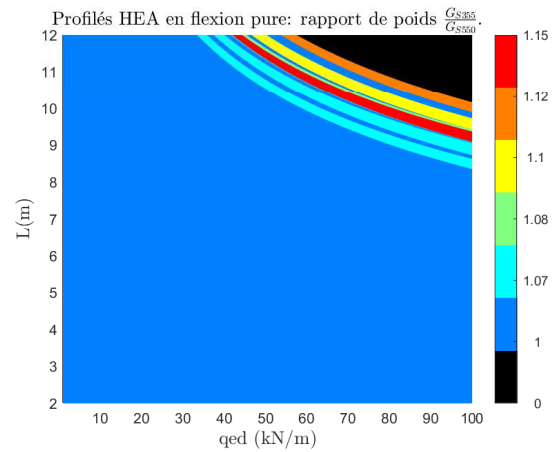
(c) Profils HEA S620 sans déversement



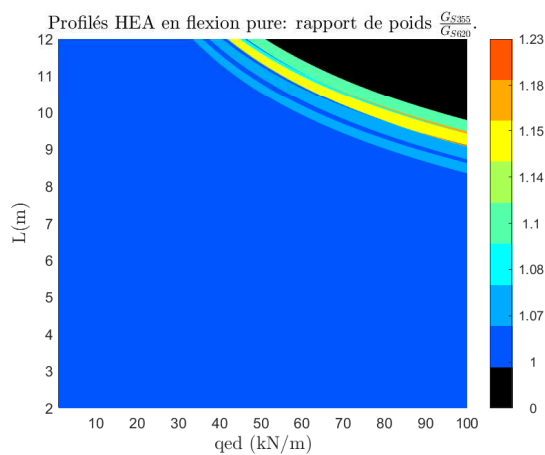
(d) Profils HEA S690 sans déversement



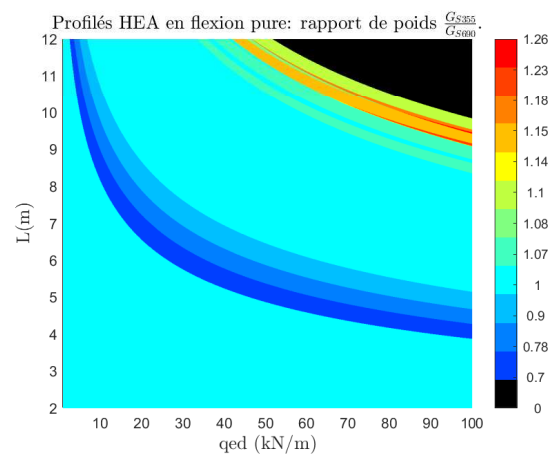
(a) Profils HEA S500 avec déversement



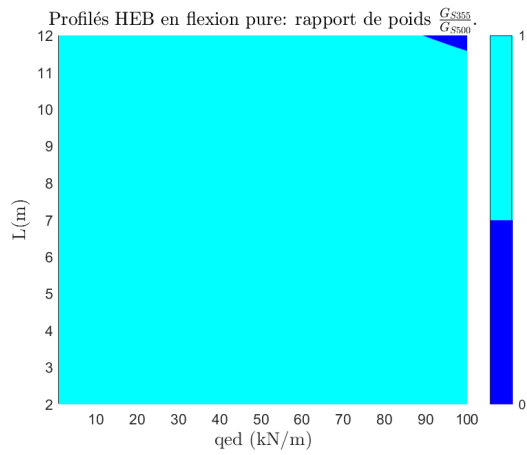
(b) Profils HEA S550 avec déversement



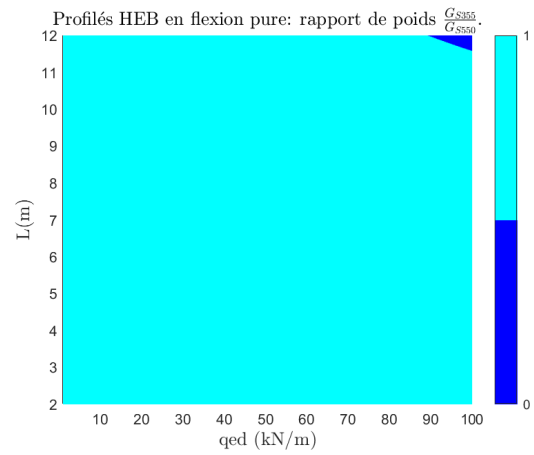
(c) Profils HEA S620 avec déversement



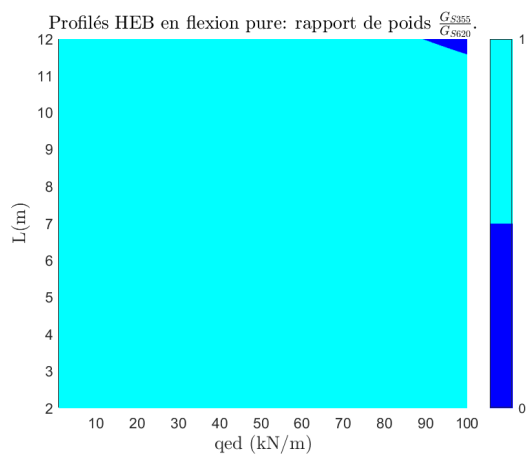
(d) Profils HEA S690 avec déversement



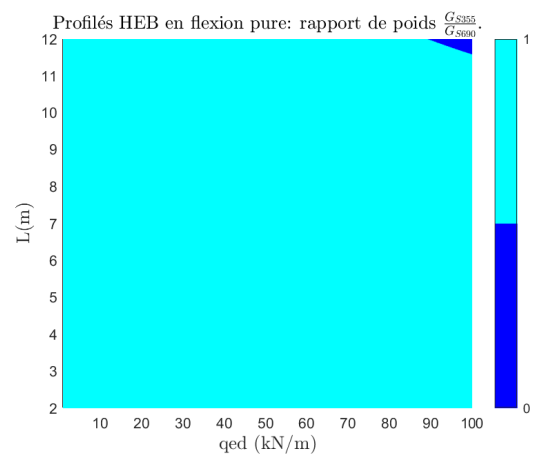
(a) Profils HEB S500 sans déversement



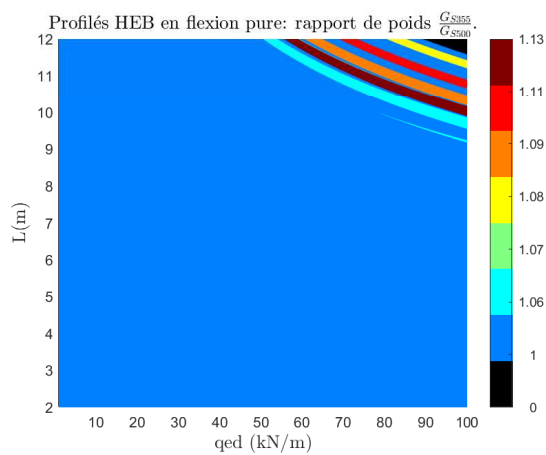
(b) Profils HEB S550 sans déversement



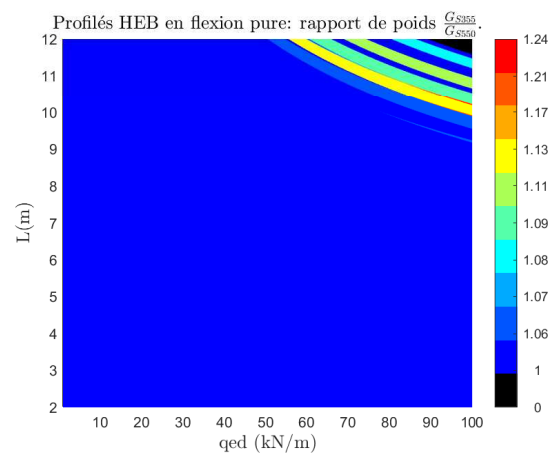
(c) Profils HEB S620 sans déversement



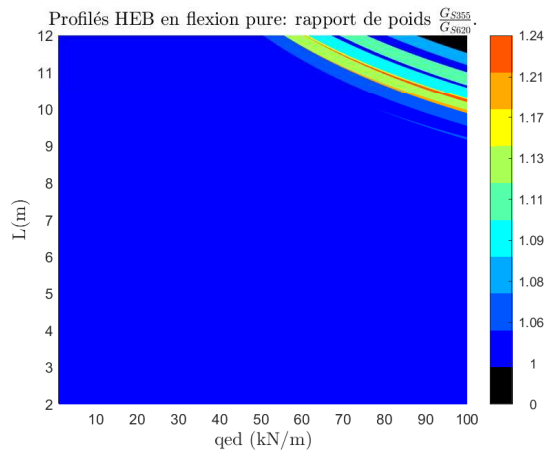
(d) Profils HEB S690 sans déversement



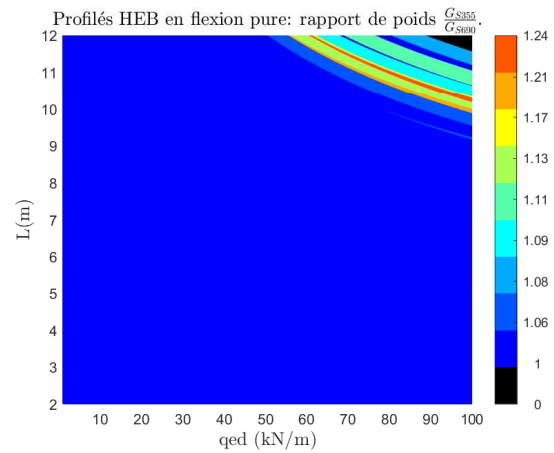
(a) Profils HEB S500 avec déversement



(b) Profils HEB S550 avec déversement

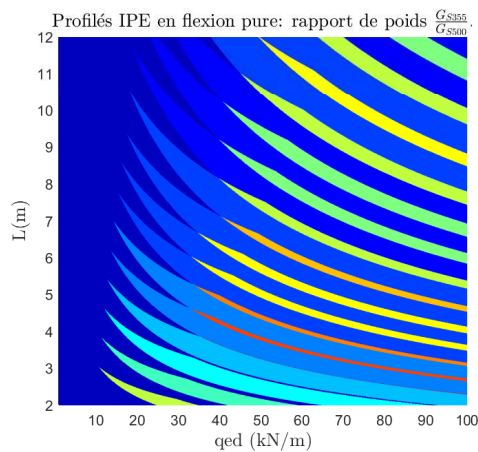


(c) Profils HEB S620 avec déversement

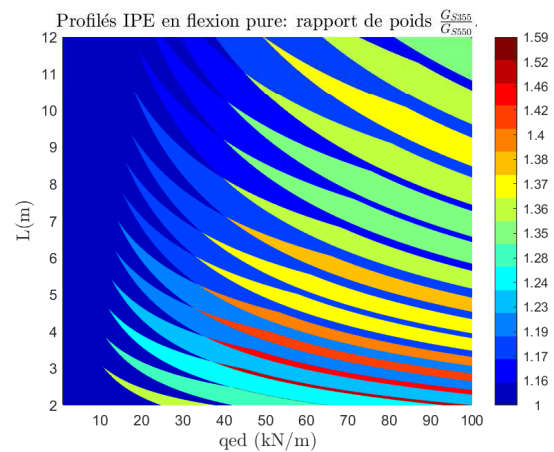


(d) Profils HEB S690 avec déversement

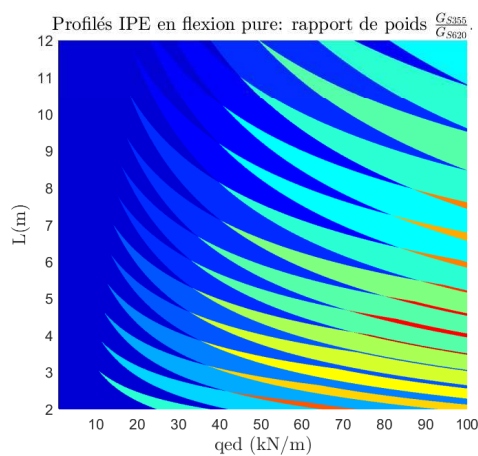
C.2 Poutres secondaires bi-encastées



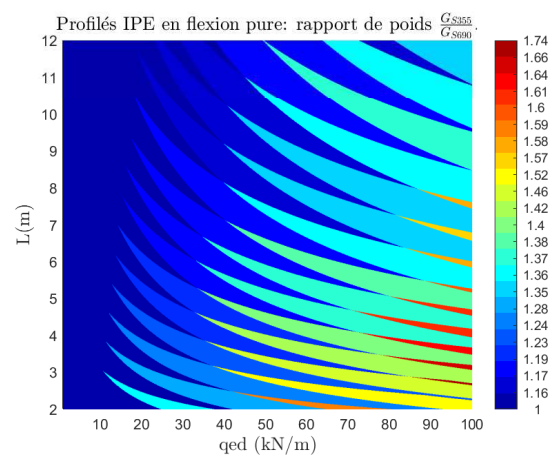
(a) Profils IPE S500 sans déversement



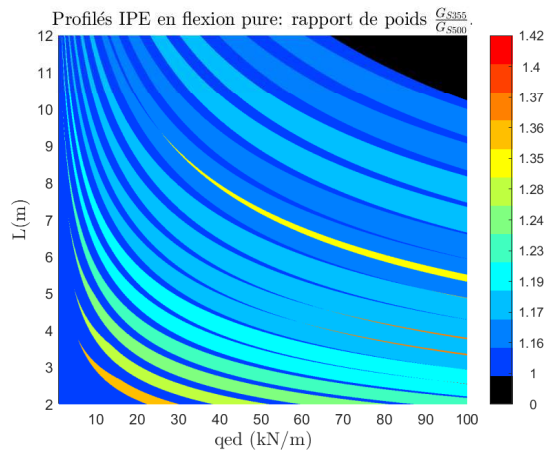
(b) Profils IPE S550 sans déversement



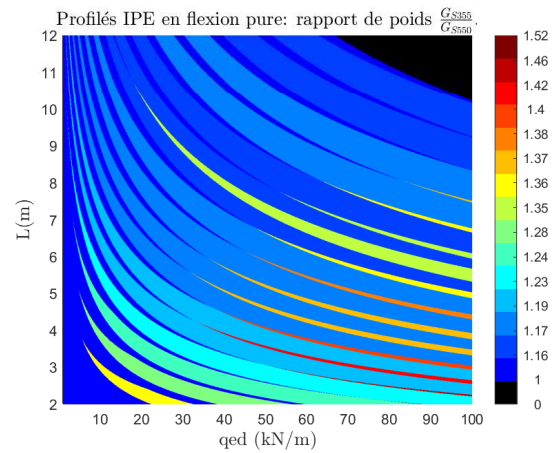
(c) Profils IPE S620 sans déversement



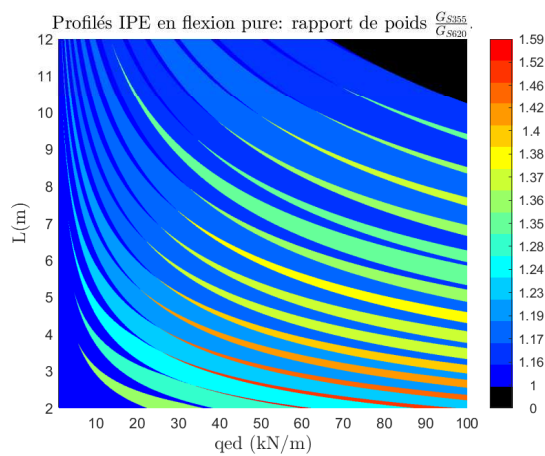
(d) Profils IPE S690 sans déversement



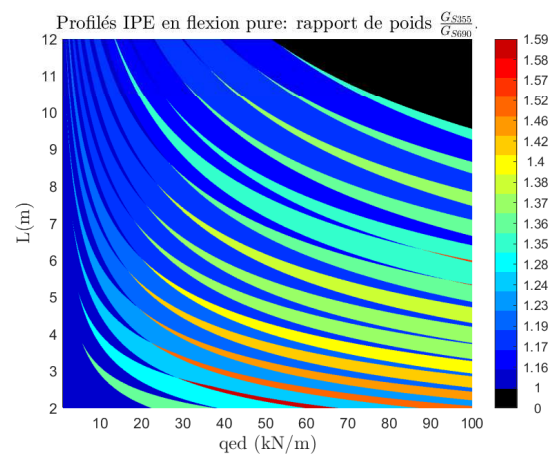
(a) Profils IPE S500 avec déversement



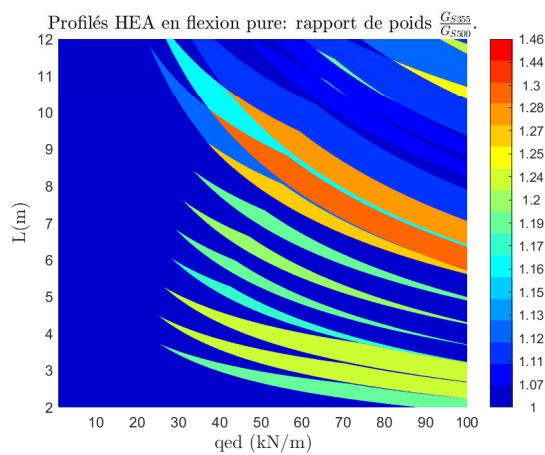
(b) Profils IPE S550 avec déversement



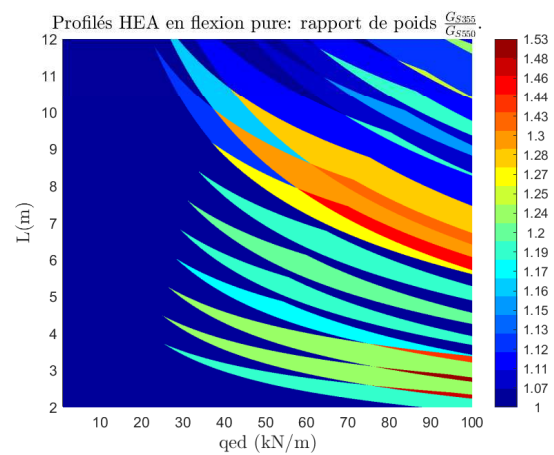
(c) Profils IPE S620 avec déversement



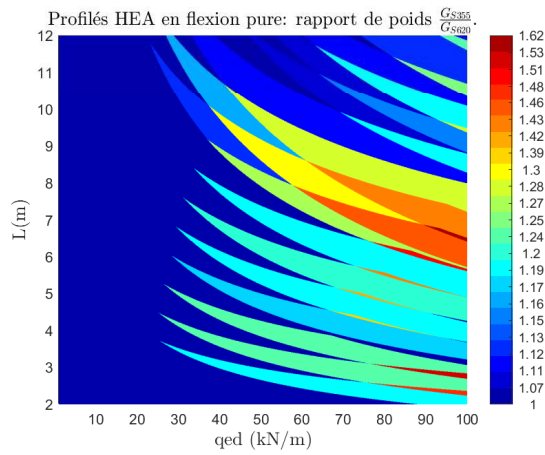
(d) Profils IPE S690 avec déversement



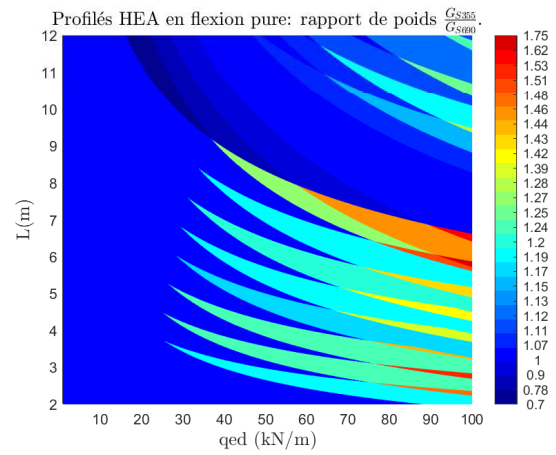
(a) Profils HEA S500 sans déversement



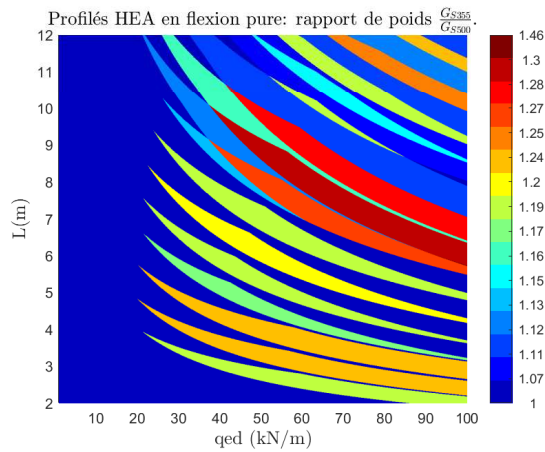
(b) Profils HEA S550 sans déversement



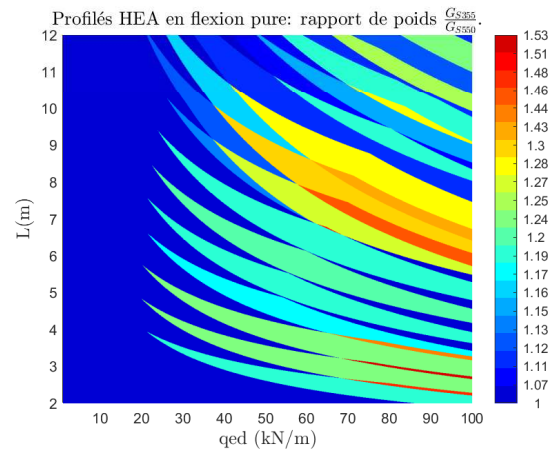
(c) Profils HEA S620 sans déversement



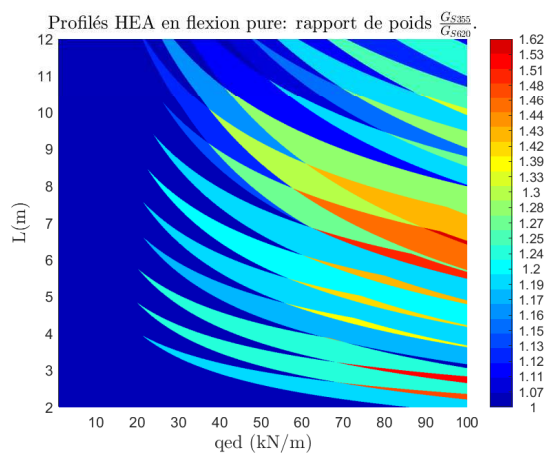
(d) Profils HEA S690 sans déversement



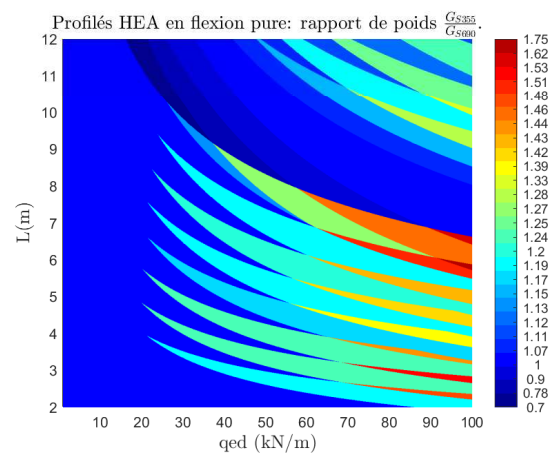
(a) Profils HEA S500 avec déversement



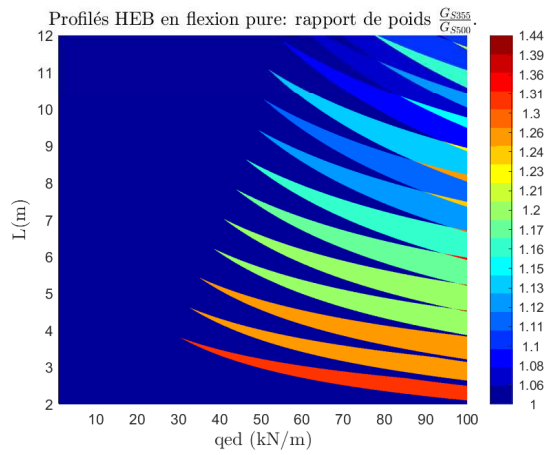
(b) Profils HEA S550 avec déversement



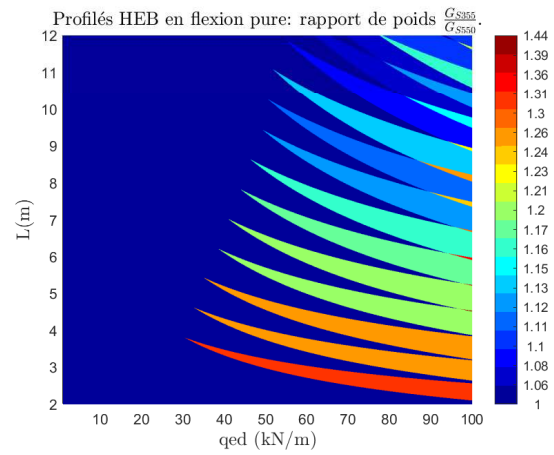
(c) Profils HEA S620 avec déversement



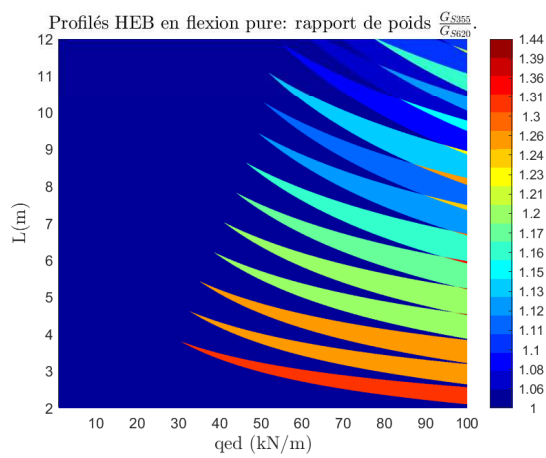
(d) Profils HEA S690 avec déversement



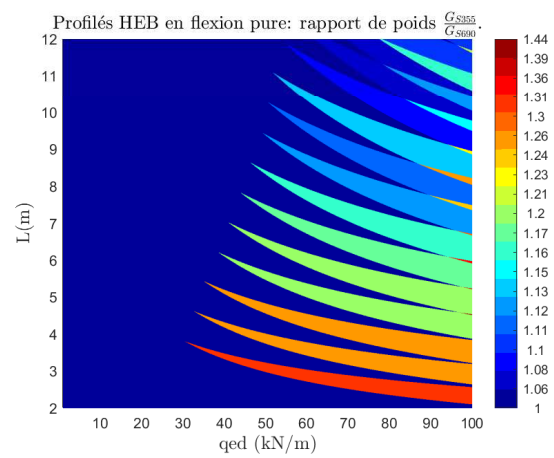
(a) Profils HEB S500 sans déversement



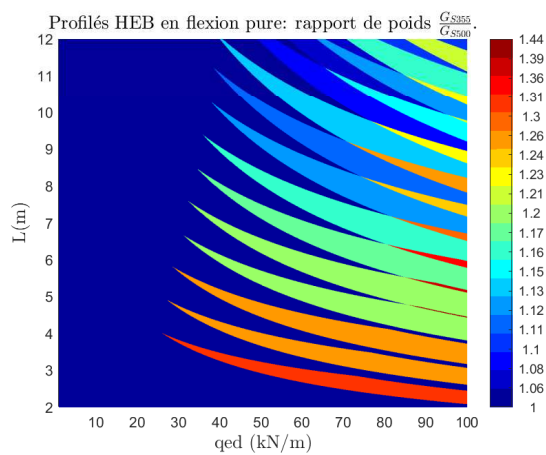
(b) Profils HEB S550 sans déversement



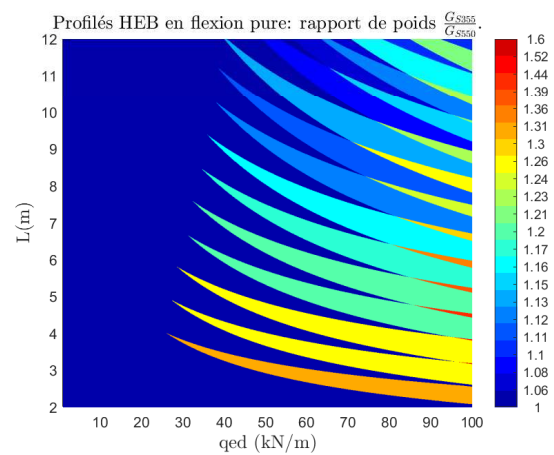
(c) Profils HEB S620 sans déversement



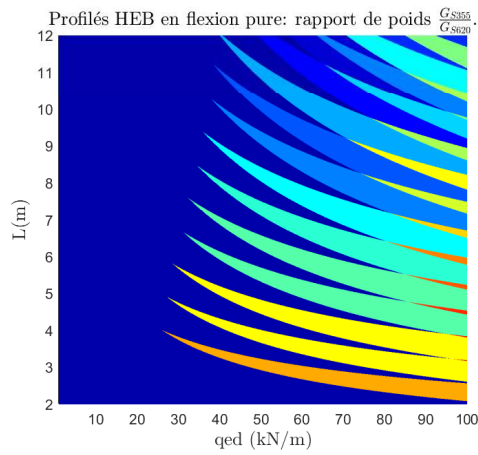
(d) Profils HEB S690 sans déversement



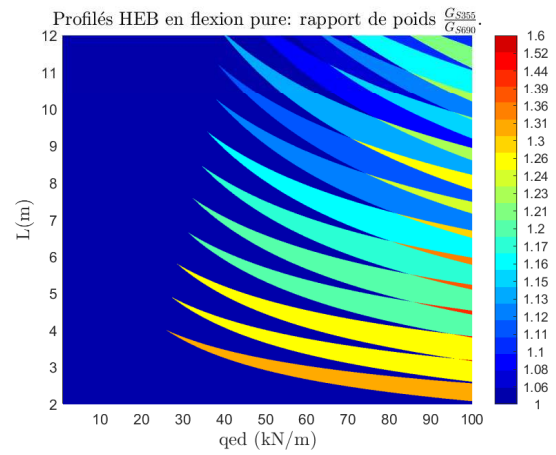
(a) Profils HEB S500 avec déversement



(b) Profils HEB S550 avec déversement

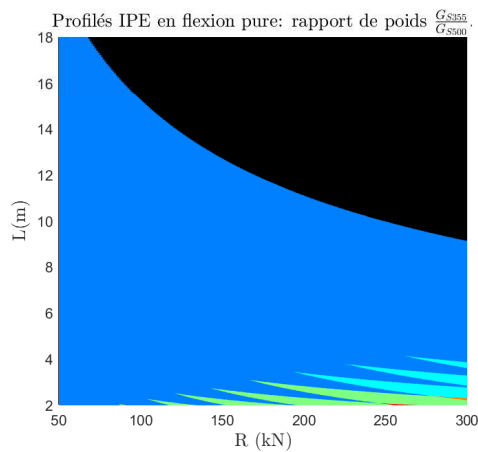


(c) Profils HEB S620 avec déversement

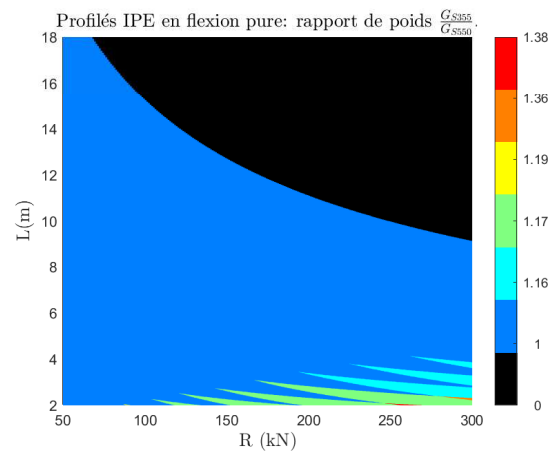


(d) Profils HEB S690 avec déversement

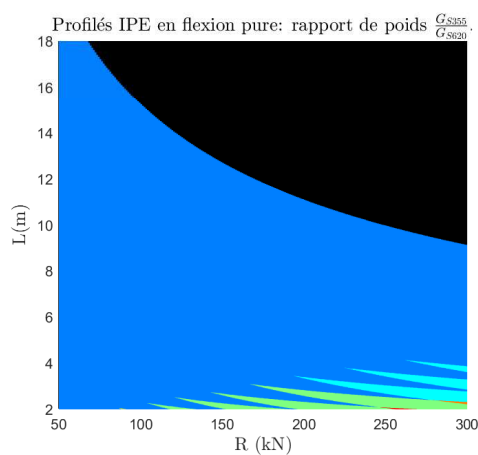
C.3 Poutres primaires bi-appuyées



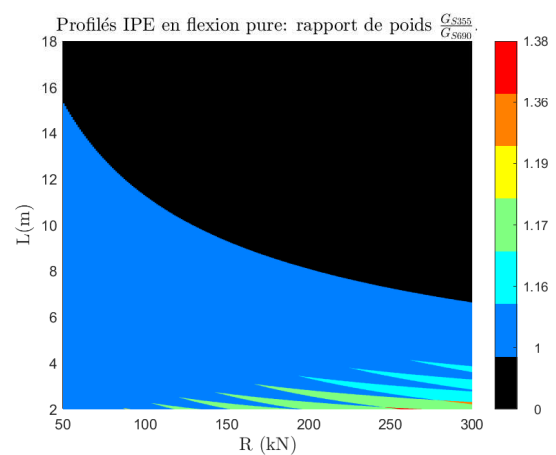
(a) Profils IPE S500 sans déversement



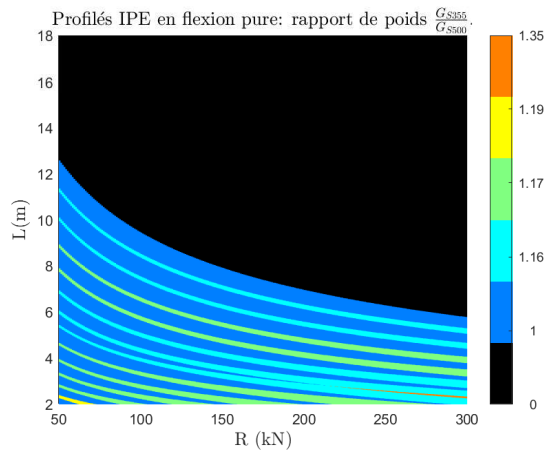
(b) Profils IPE S550 sans déversement



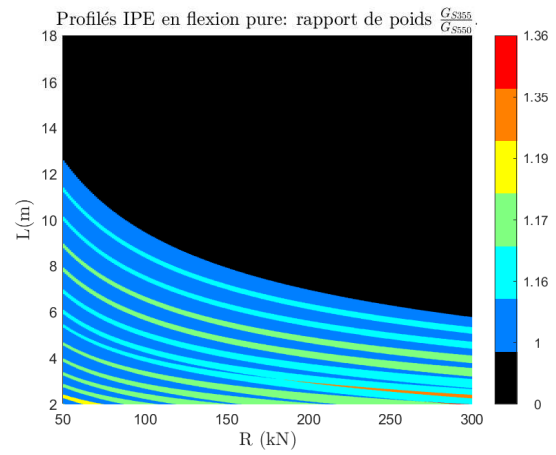
(c) Profils IPE S620 sans déversement



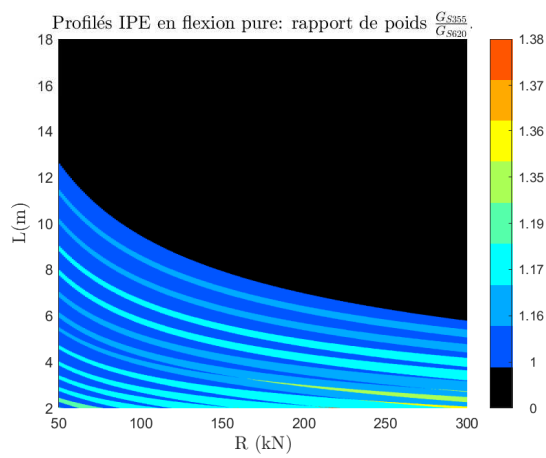
(d) Profils IPE S690 sans déversement



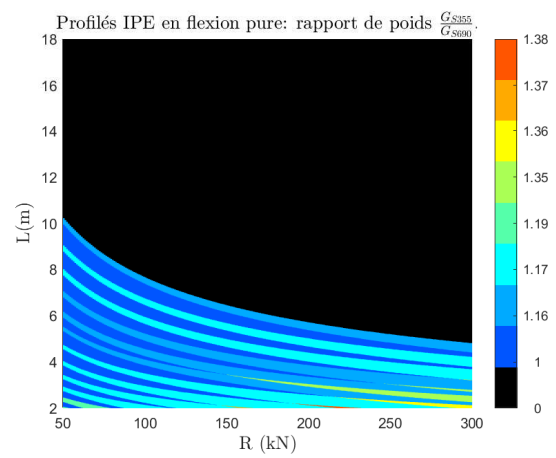
(a) Profils IPE S500 avec déversement



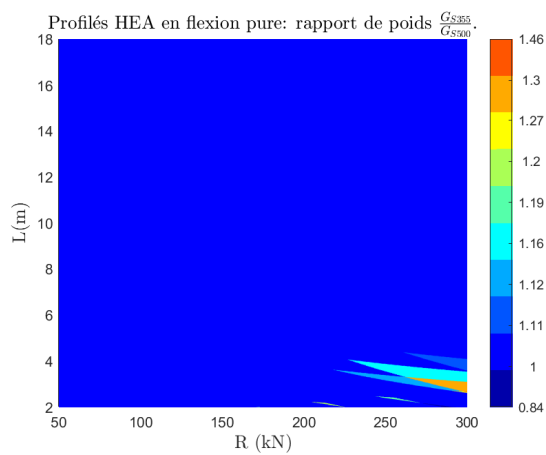
(b) Profils IPE S550 avec déversement



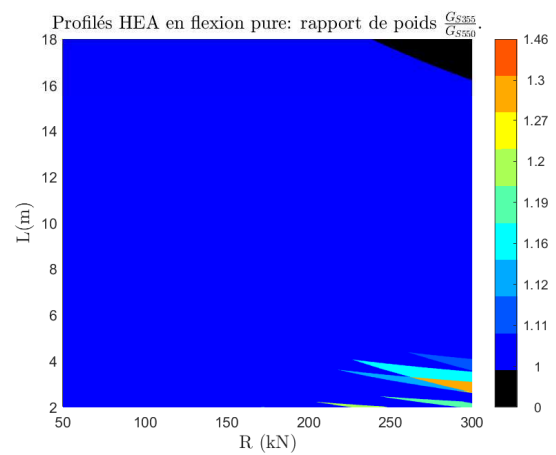
(c) Profils IPE S620 avec déversement



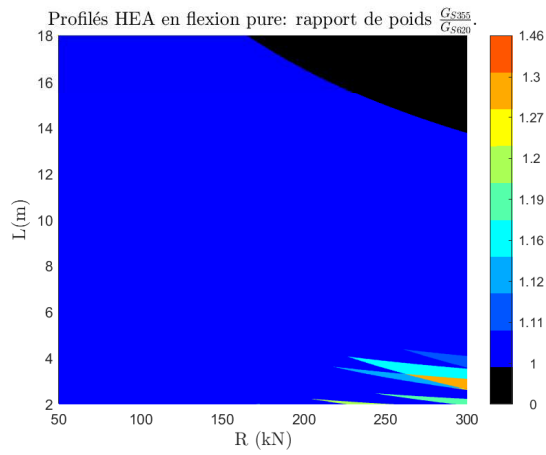
(d) Profils IPE S690 avec déversement



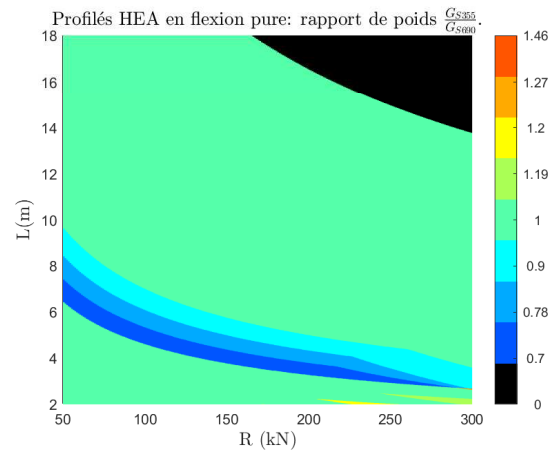
(a) Profils HEA S500 sans déversement



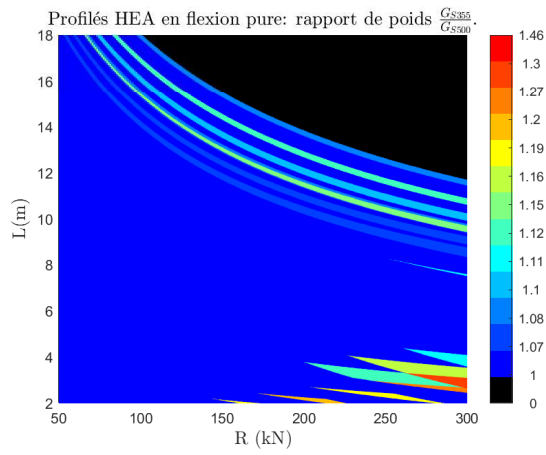
(b) Profils HEA S550 sans déversement



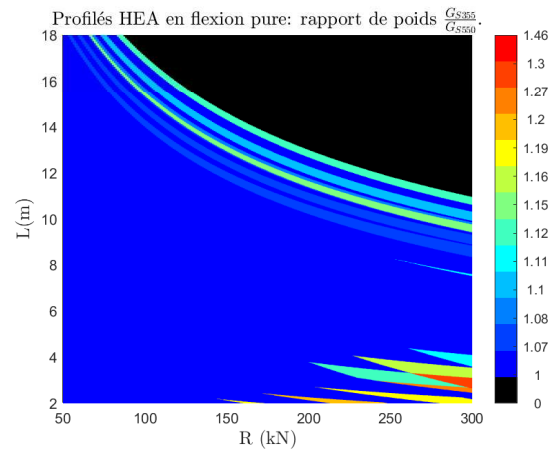
(c) Profils HEA S620 sans déversement



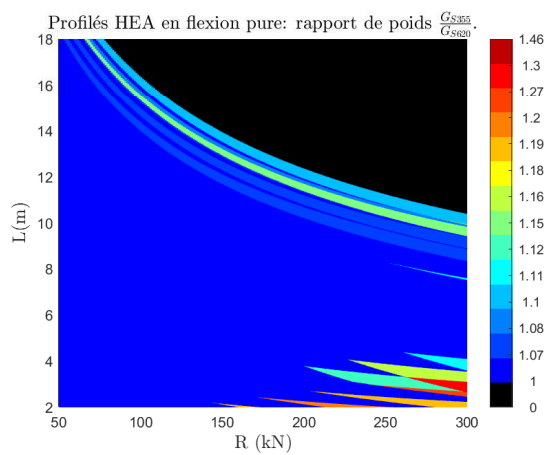
(d) Profils HEA S690 sans déversement



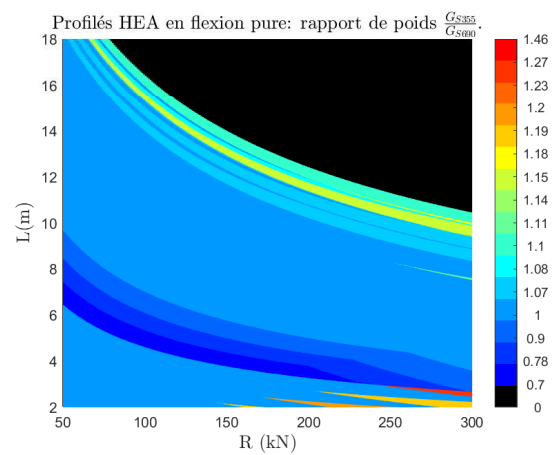
(a) Profils HEA S500 avec déversement



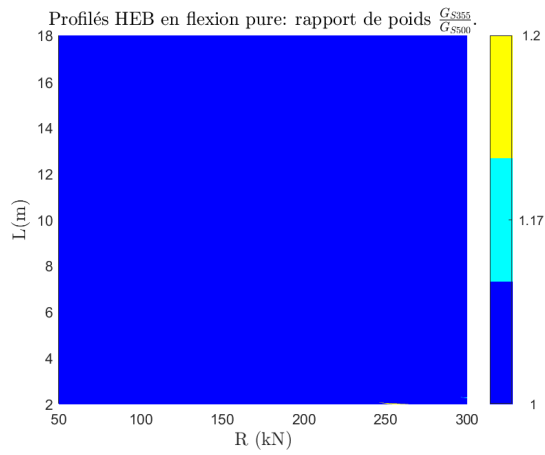
(b) Profils HEA S550 avec déversement



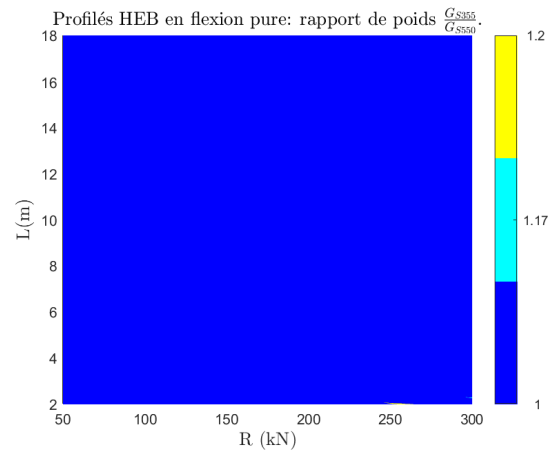
(c) Profils HEA S620 avec déversement



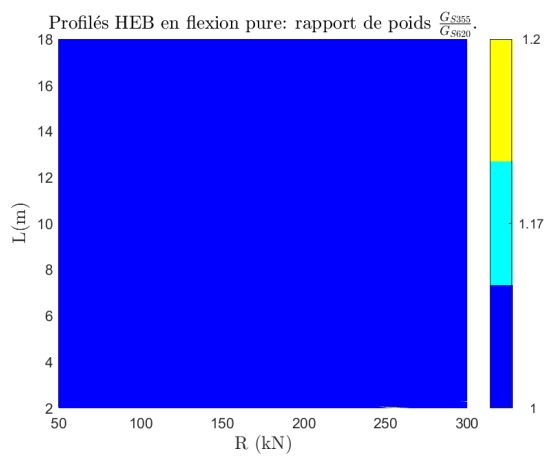
(d) Profils HEA S690 avec déversement



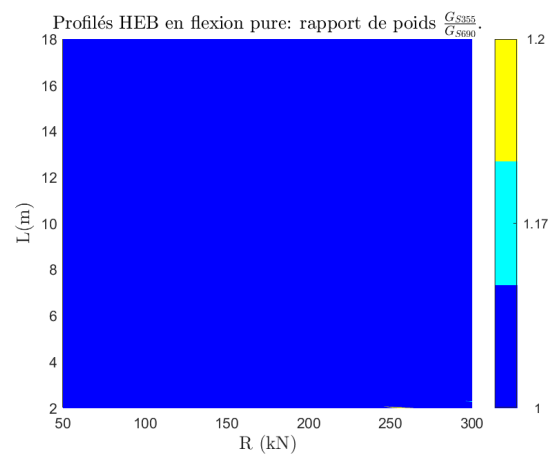
(a) Profils HEB S500 sans déversement



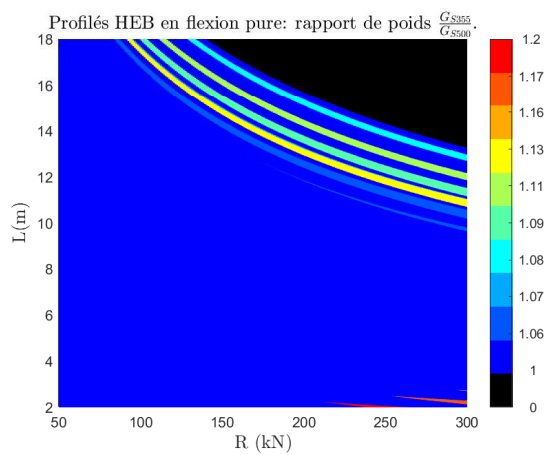
(b) Profils HEB S550 sans déversement



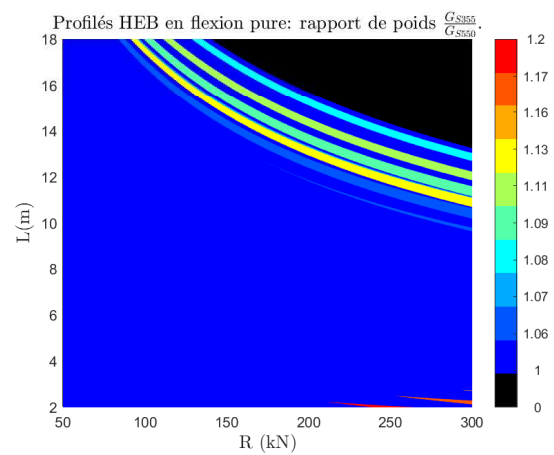
(c) Profils HEB S620 sans déversement



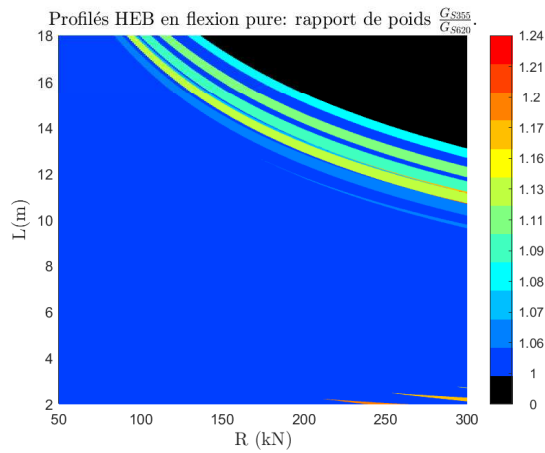
(d) Profils HEB S690 sans déversement



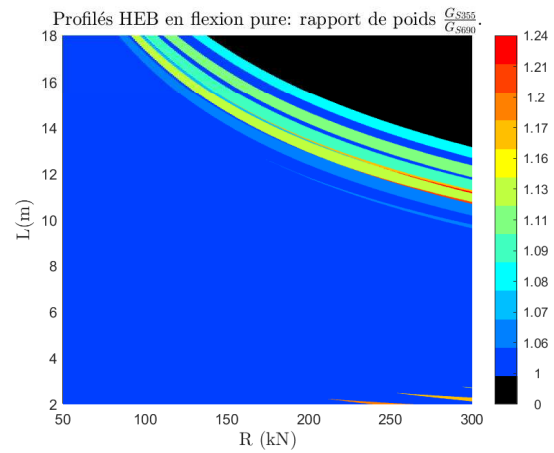
(a) Profils HEB S500 avec déversement



(b) Profils HEB S550 avec déversement

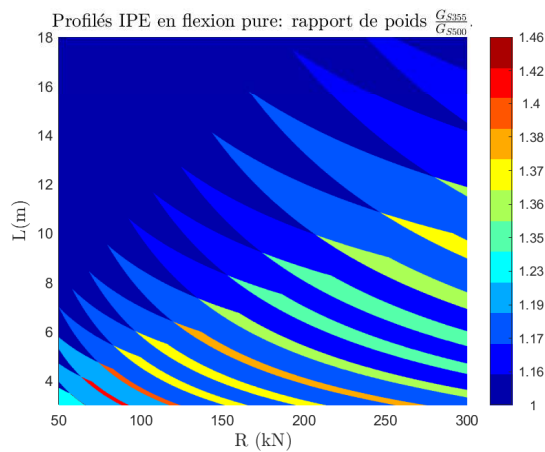


(c) Profils HEB S620 avec déversement

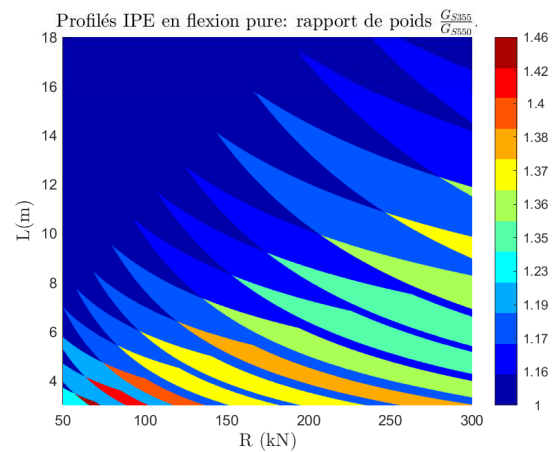


(d) Profils HEB S690 avec déversement

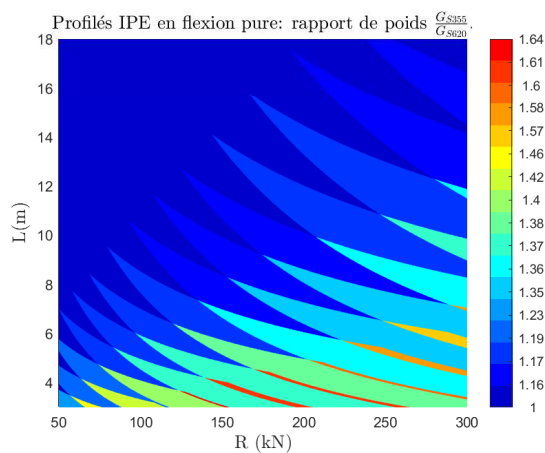
C.4 Poutres primaires bi-encastées



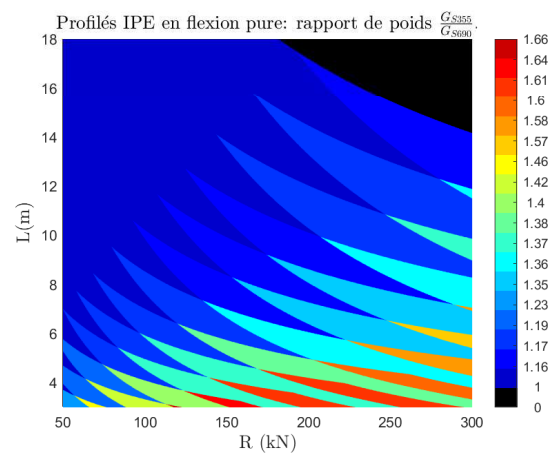
(a) Profils IPE S500 sans déversement



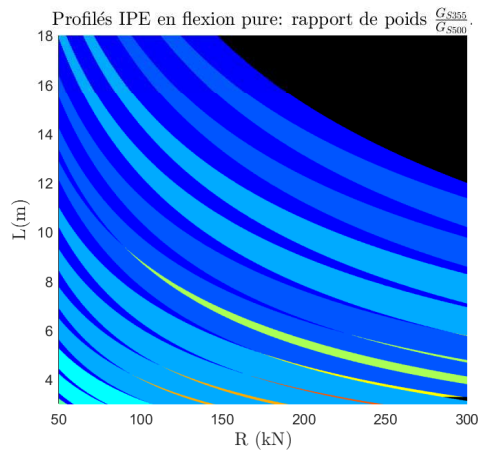
(b) Profils IPE S550 sans déversement



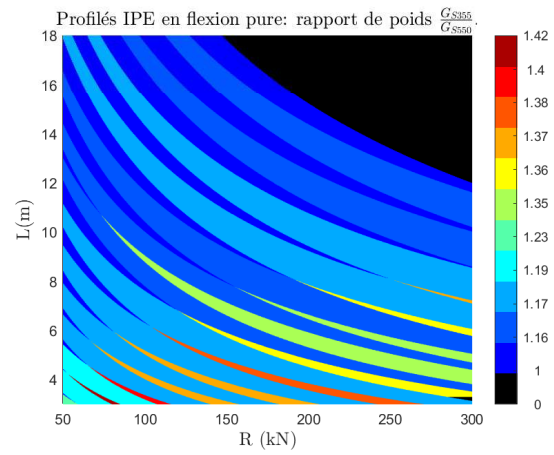
(c) Profils IPE S620 sans déversement



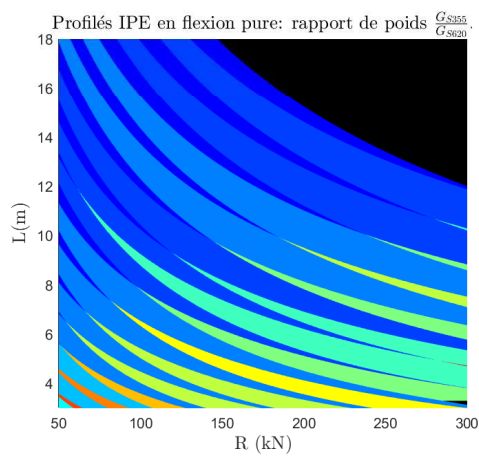
(d) Profils IPE S690 sans déversement



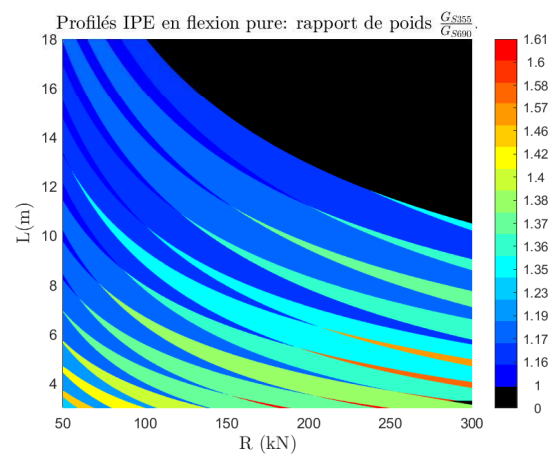
(a) Profils IPE S500 avec déversement



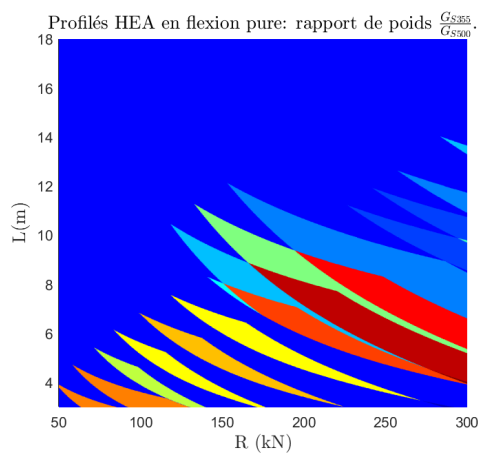
(b) Profils IPE S550 avec déversement



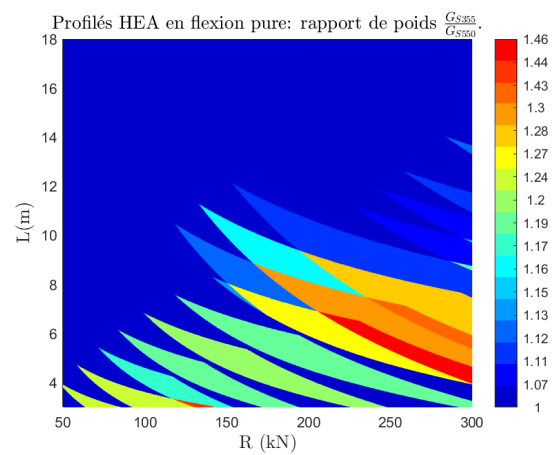
(c) Profils IPE S620 avec déversement



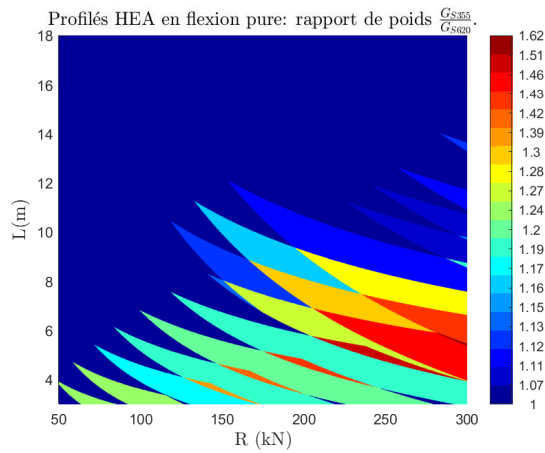
(d) Profils IPE S690 avec déversement



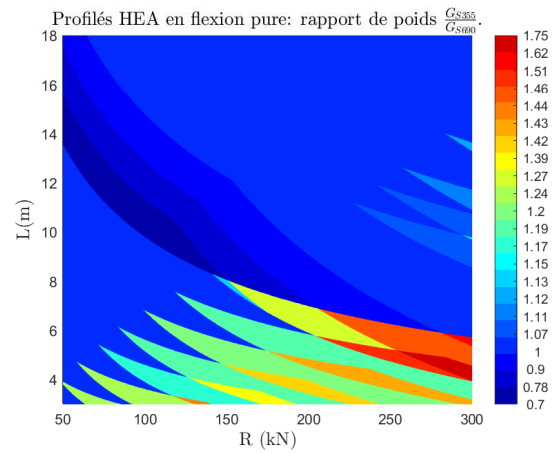
(a) Profils HEA S500 sans déversement



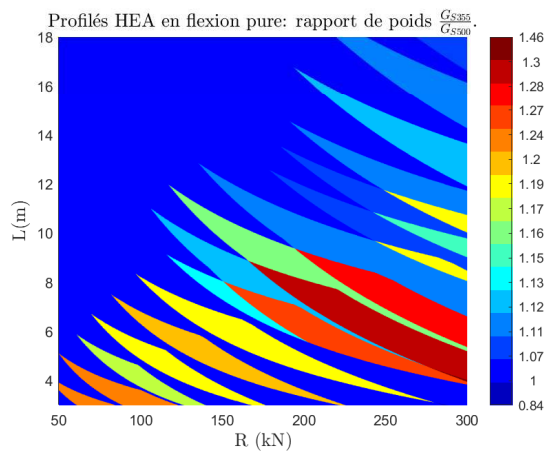
(b) Profils HEA S550 sans déversement



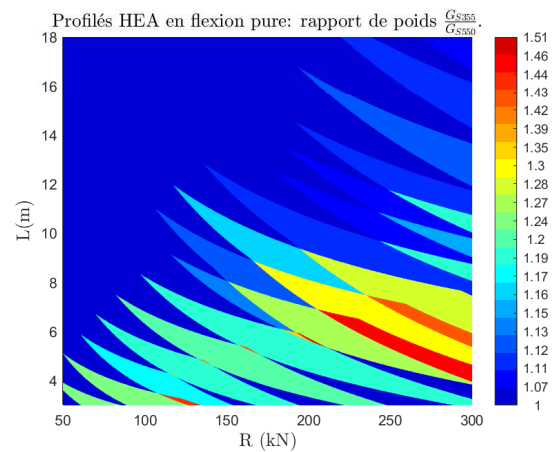
(c) Profilés HEA S620 sans déversement



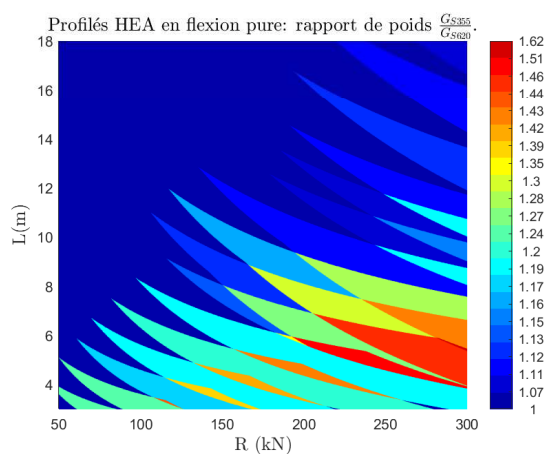
(d) Profilés HEA S690 sans déversement



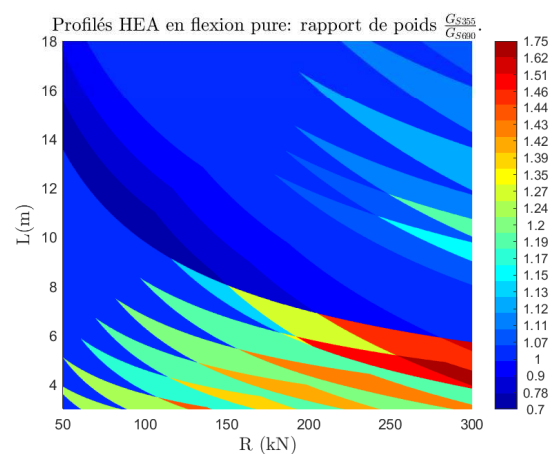
(a) Profilés HEA S500 avec déversement



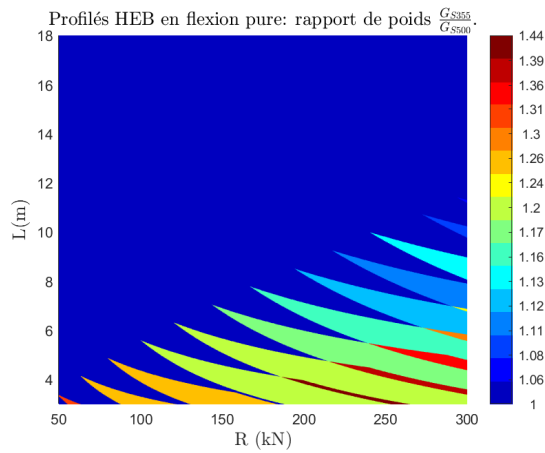
(b) Profilés HEA S550 avec déversement



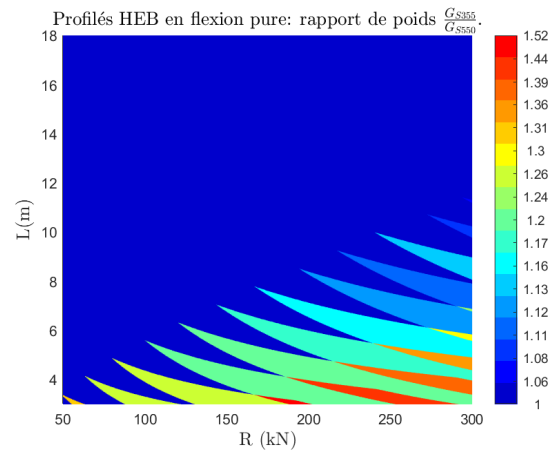
(c) Profilés HEA S620 avec déversement



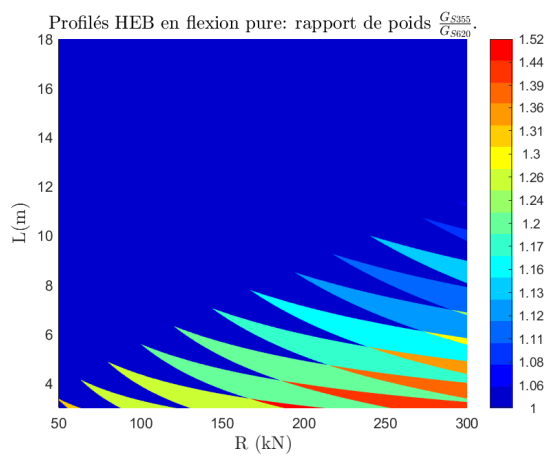
(d) Profilés HEA S690 avec déversement



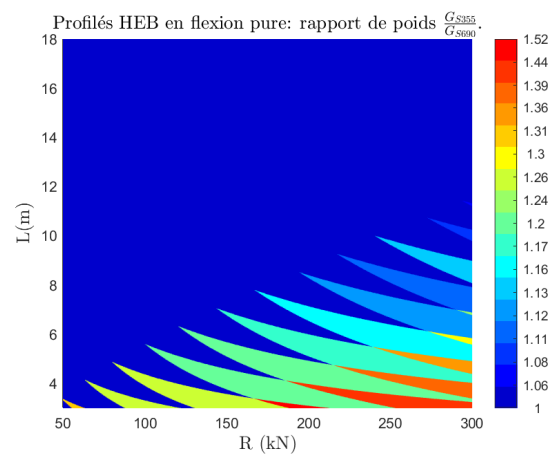
(a) Profils HEB S500 sans déversement



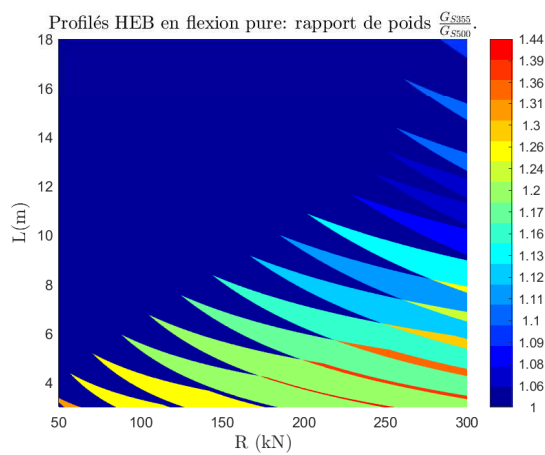
(b) Profils HEB S550 sans déversement



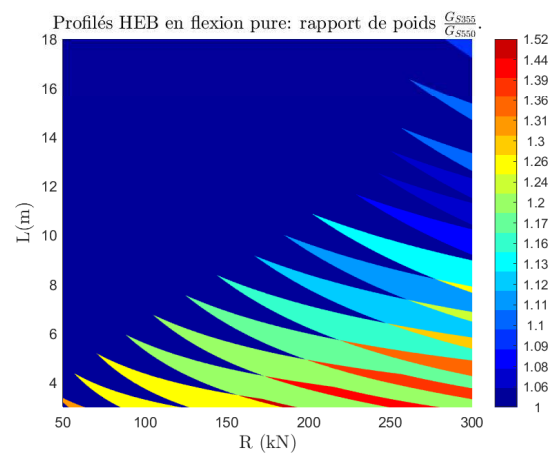
(c) Profils HEB S620 sans déversement



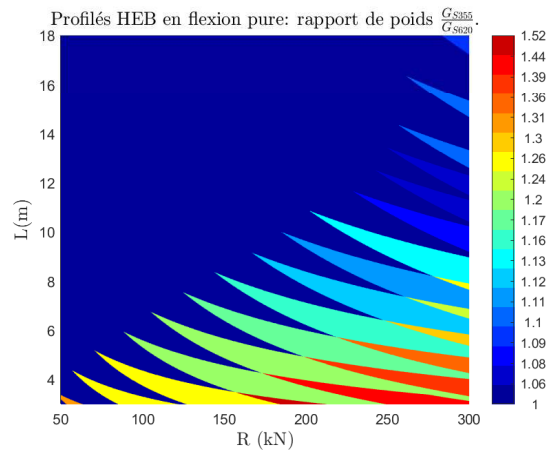
(d) Profils HEB S690 sans déversement



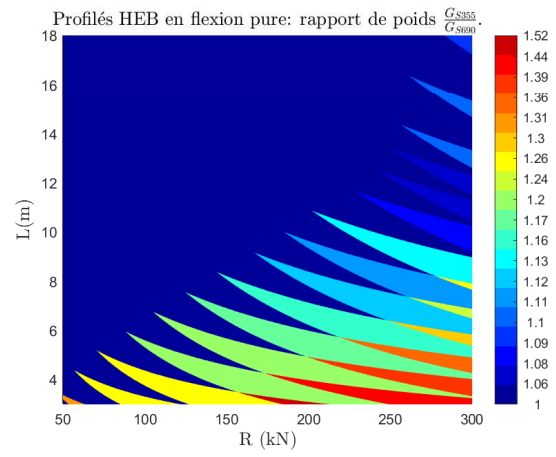
(a) Profils HEB S500 avec déversement



(b) Profils HEB S550 avec déversement



(c) Profils HEB S620 avec déversement



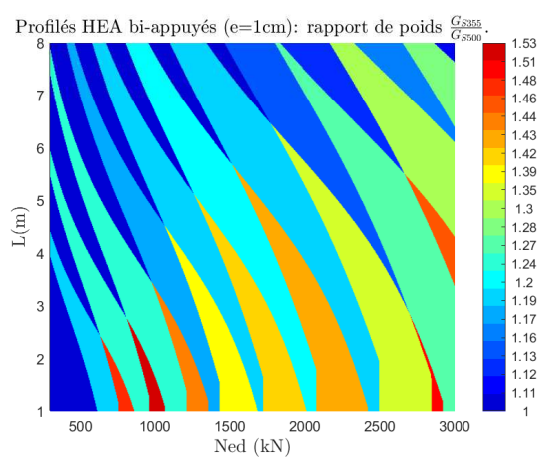
(d) Profils HEB S690 avec déversement

Annexe D

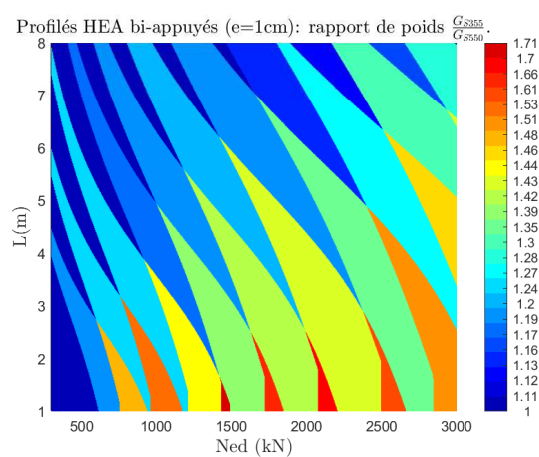
Eléments comprimés-fléchis

D.1 Flambement dans le plan (selon y) et sans déversement

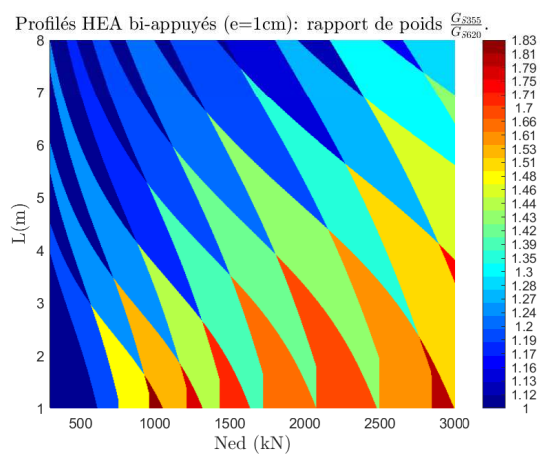
Profils HEA bi-appuyés



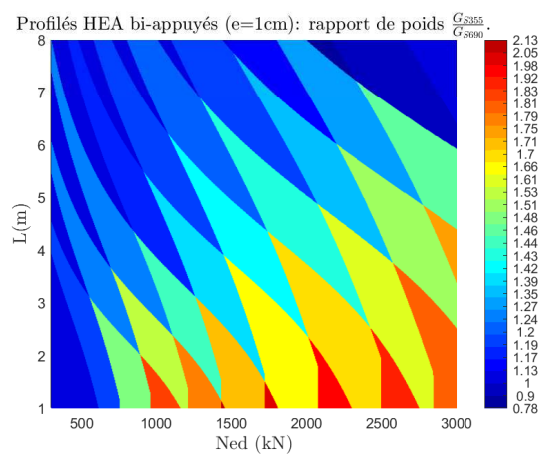
(a) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S500



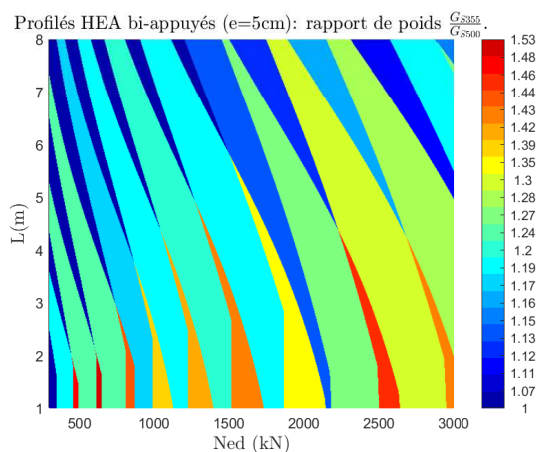
(b) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S550



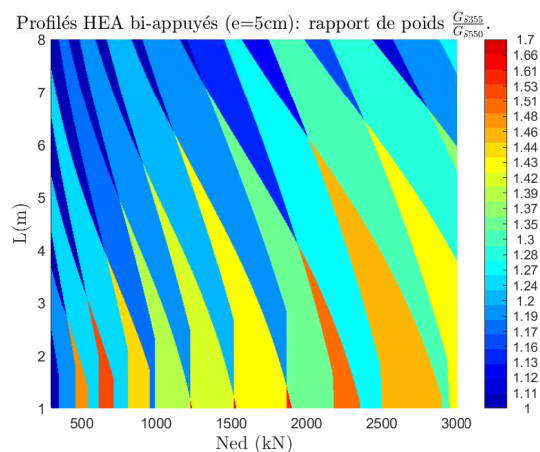
(c) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S620



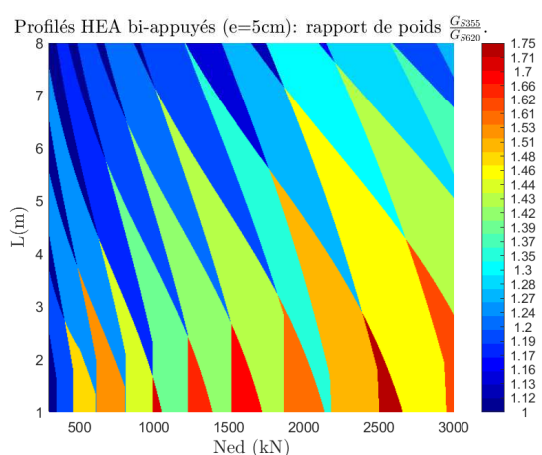
(d) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S690



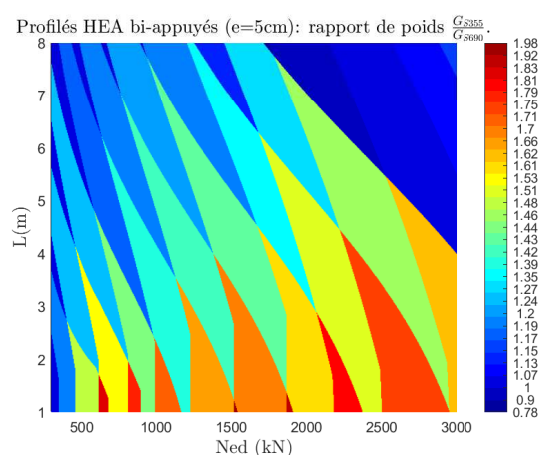
(a) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S500



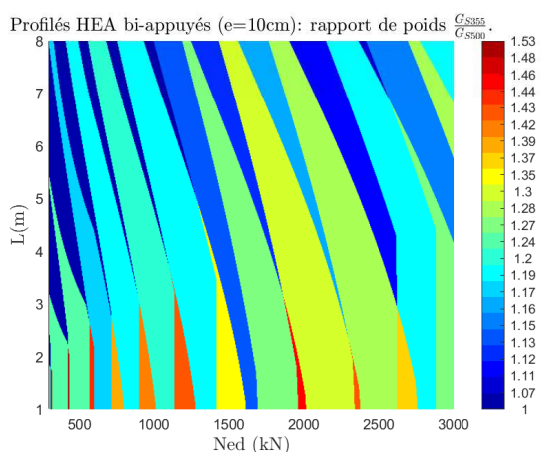
(b) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S550



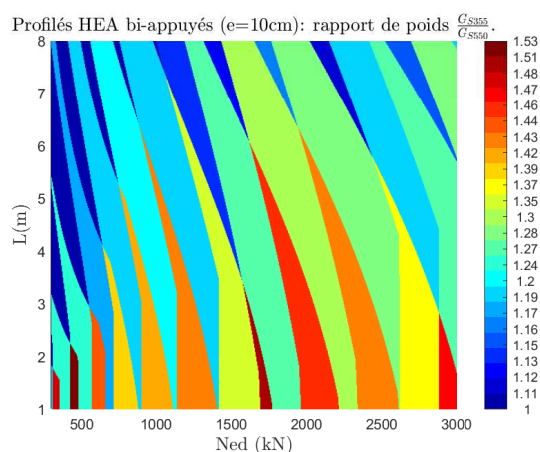
(c) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S620



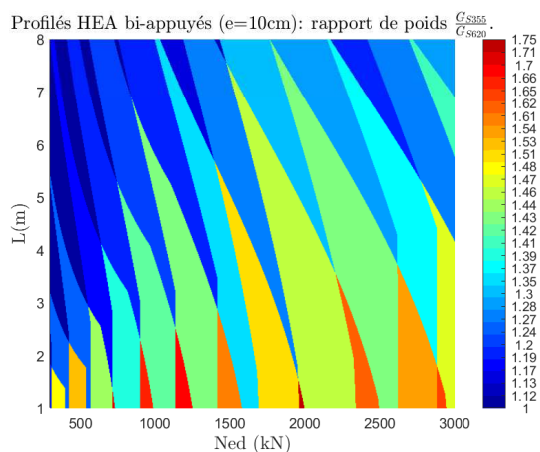
(d) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S690



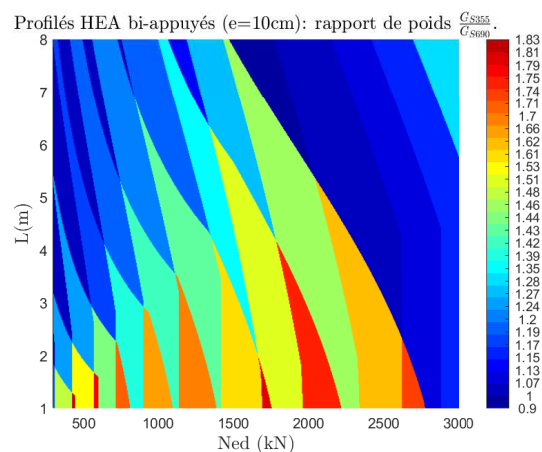
(a) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S500



(b) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S550

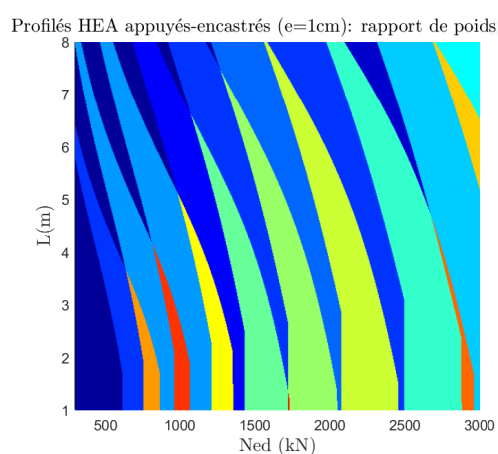


(c) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S620

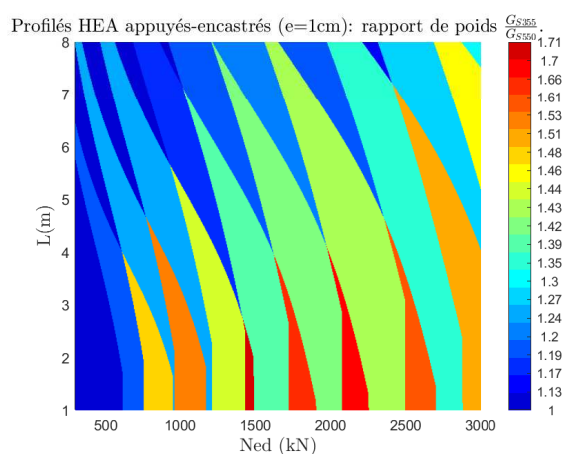


(d) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S690

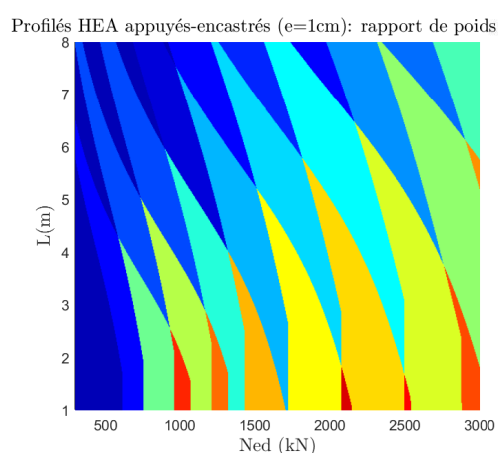
Profils HEA appuyés-encastrés



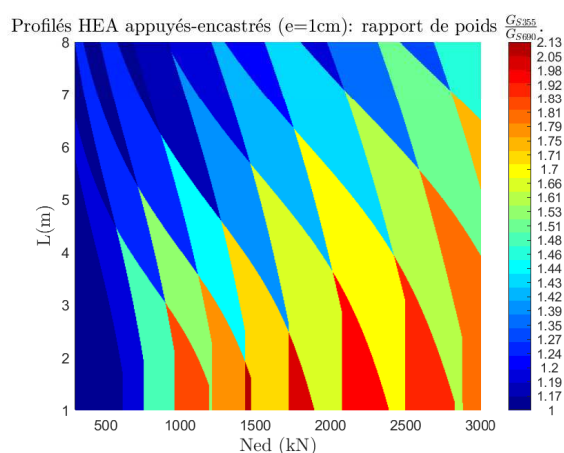
(a) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S500



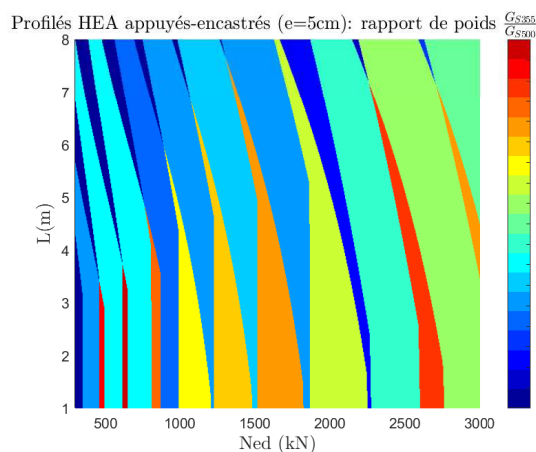
(b) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S550



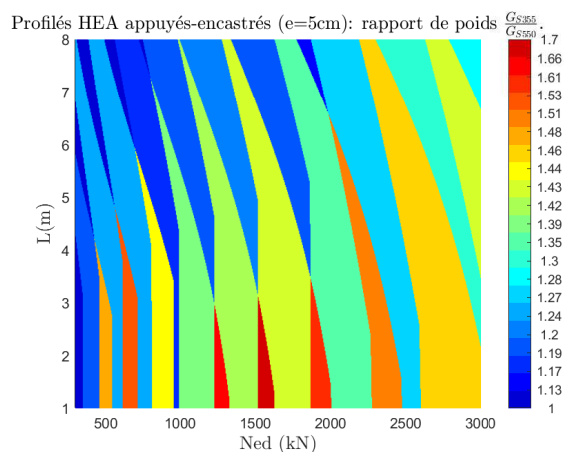
(c) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S620



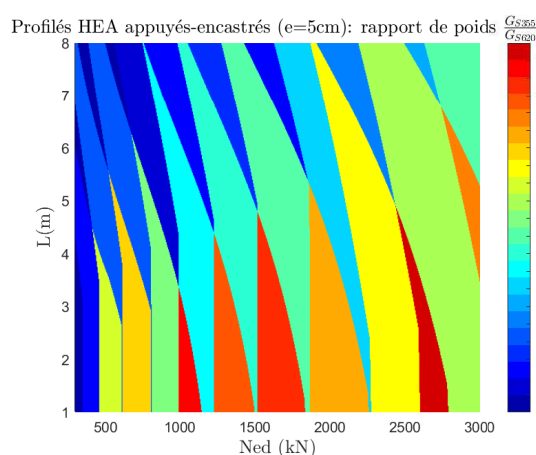
(d) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S690



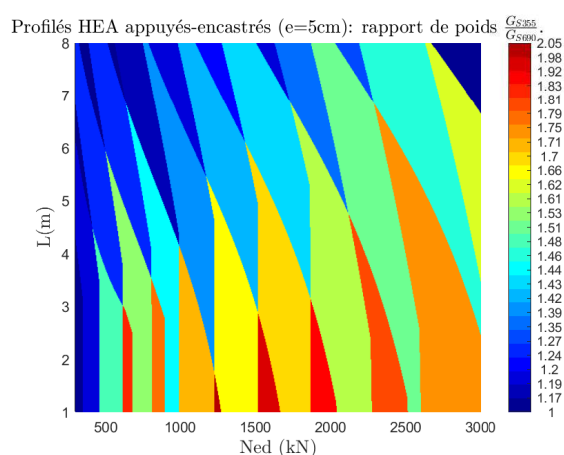
(a) HEA, appuyés-encastrés, e=5cm, S500



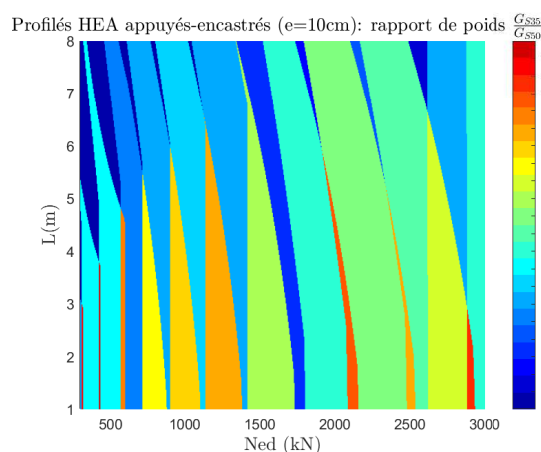
(b) HEA, appuyés-encastrés, e=5cm, S550



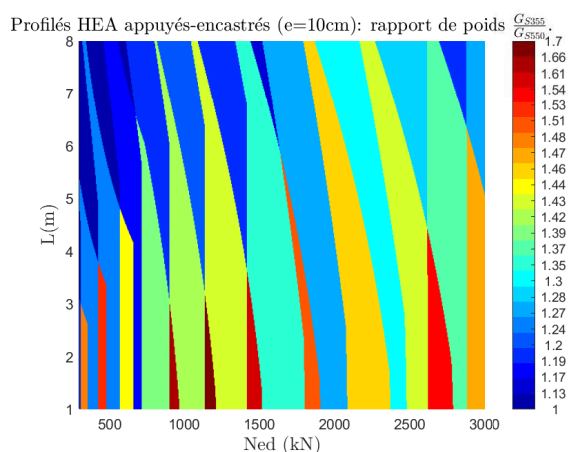
(c) HEA, appuyés-encastrés, e=5cm, S620



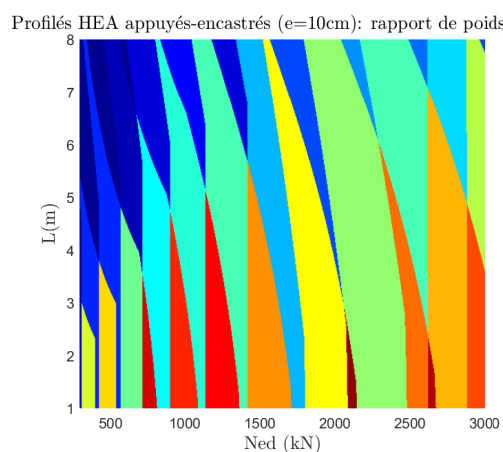
(d) HEA, appuyés-encastrés, e=5cm, S690



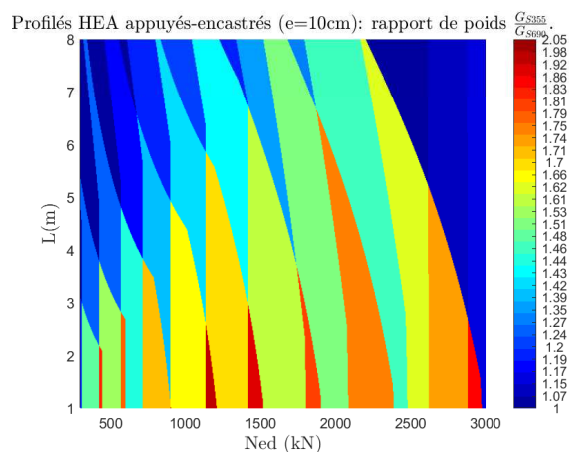
(a) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S500



(b) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S550

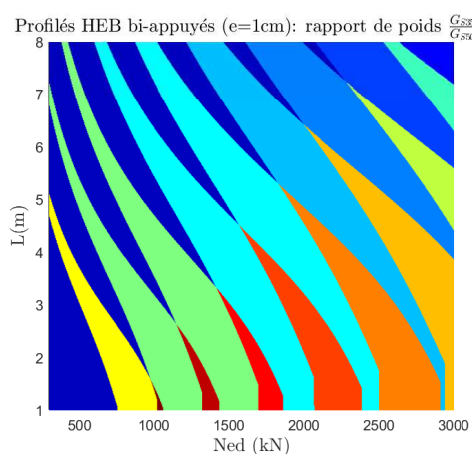


(c) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S620

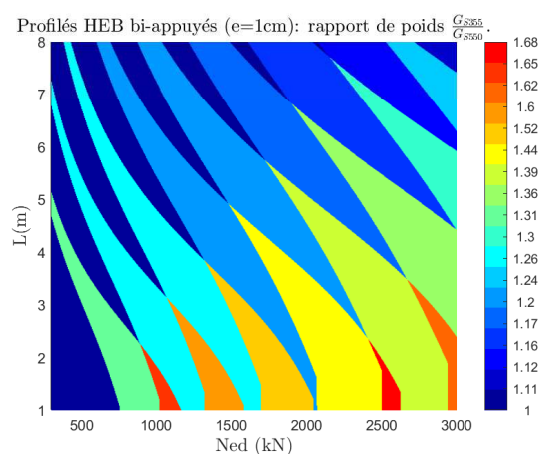


(d) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S690

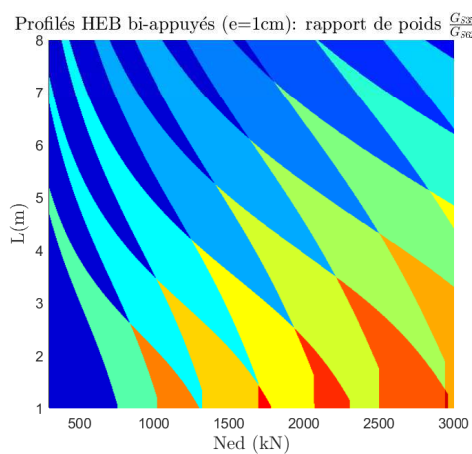
Profils HEB bi-appuyés



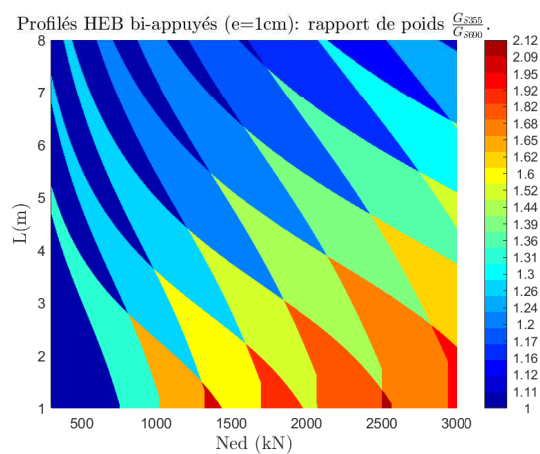
(a) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S500



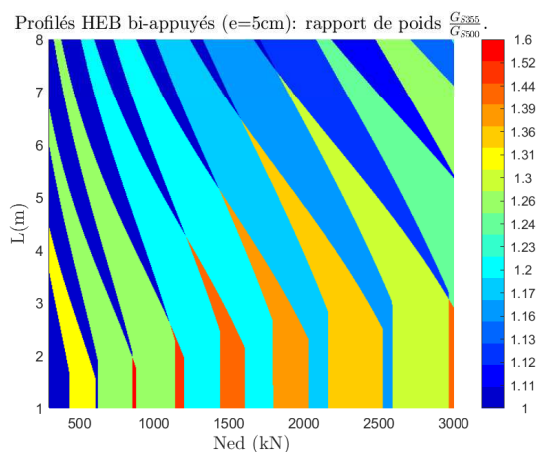
(b) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S550



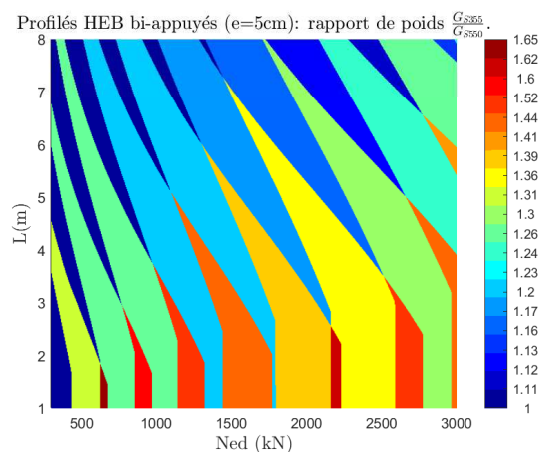
(c) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S620



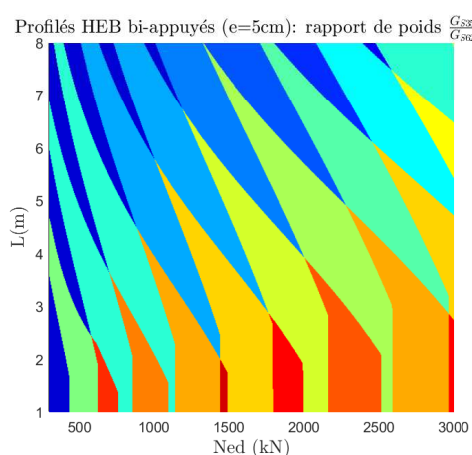
(d) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S690



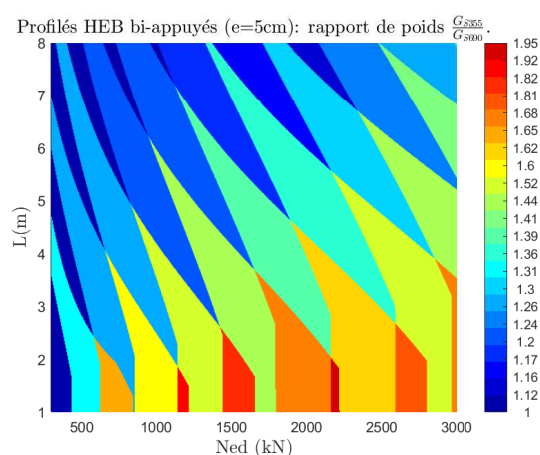
(a) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S500



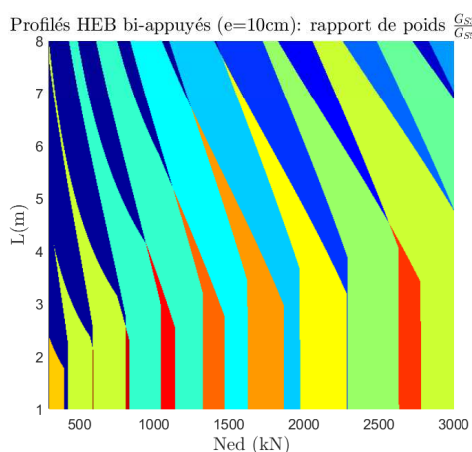
(b) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S550



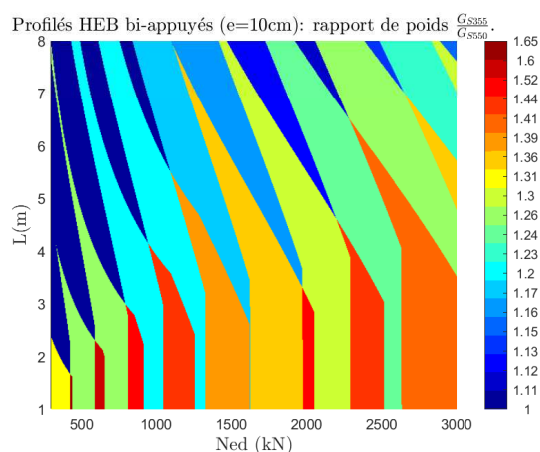
(c) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S620



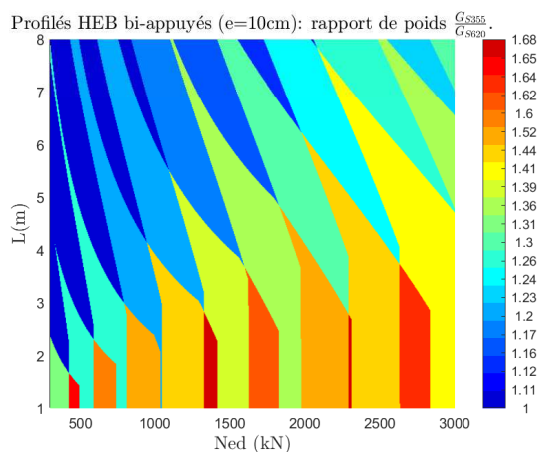
(d) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S690



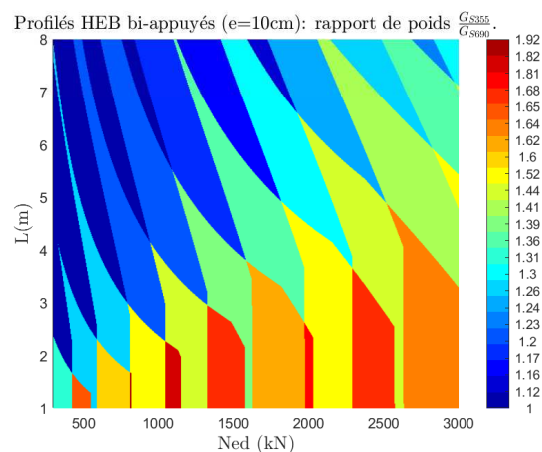
(a) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S500



(b) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S550

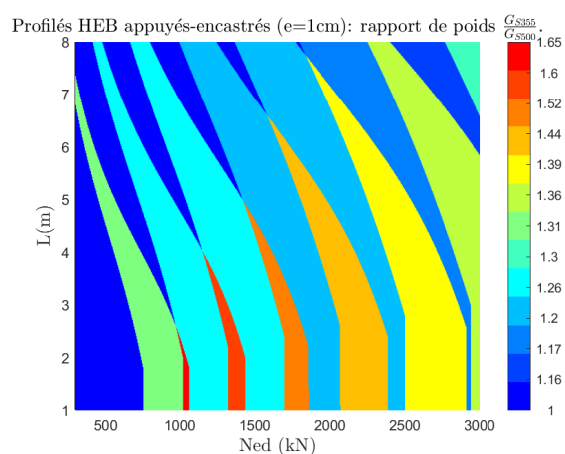


(c) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S620

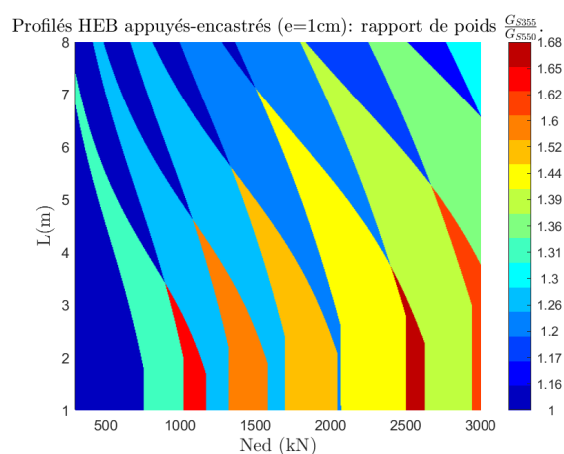


(d) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S690

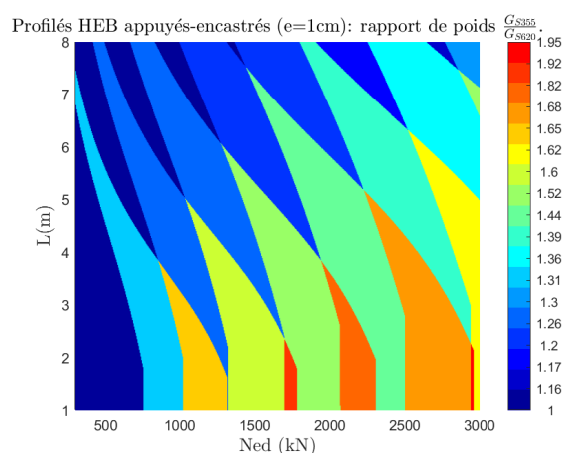
Profils HEB appuyés-encastrés



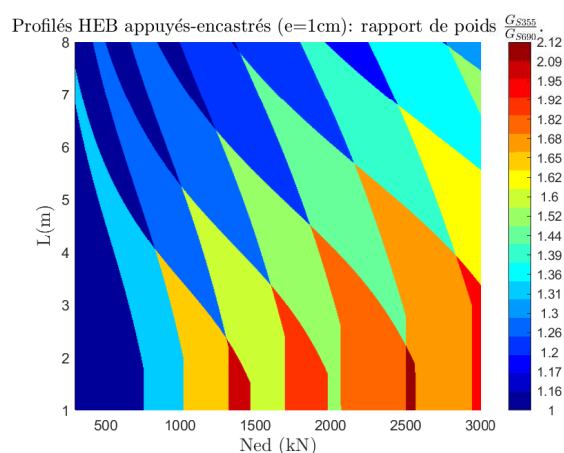
(a) HEB, appuyés-encastrés, e=1cm, S500



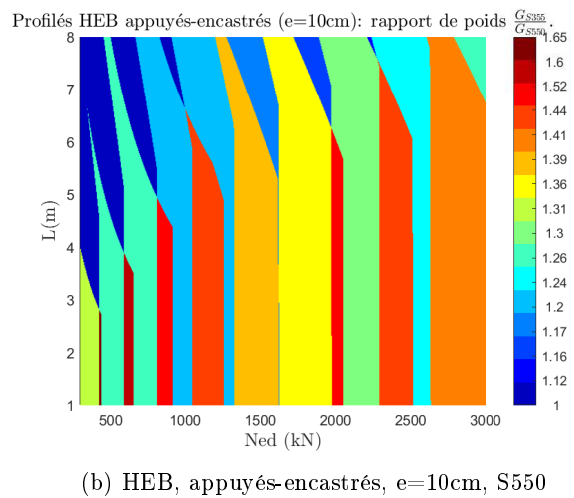
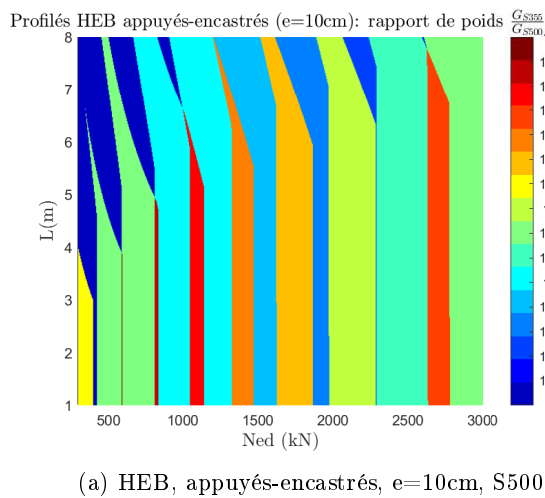
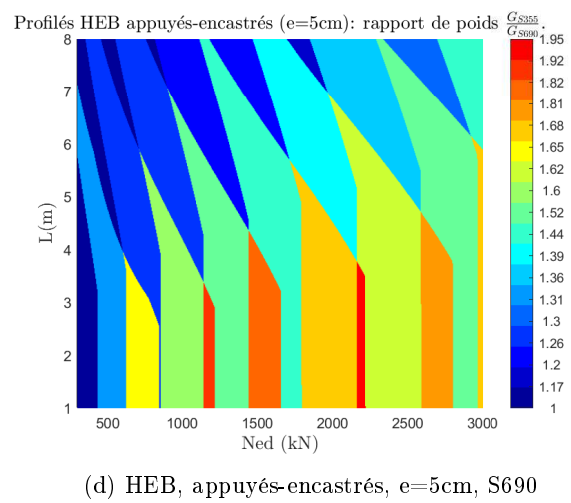
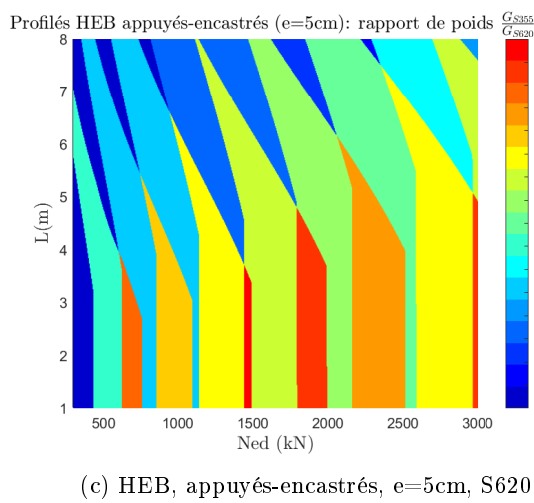
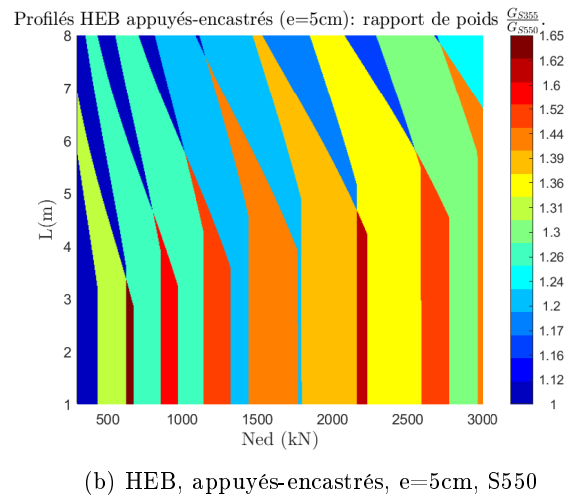
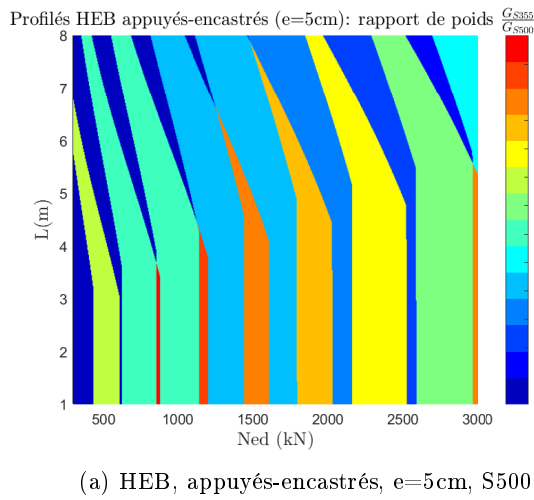
(b) HEB, appuyés-encastrés, e=1cm, S550

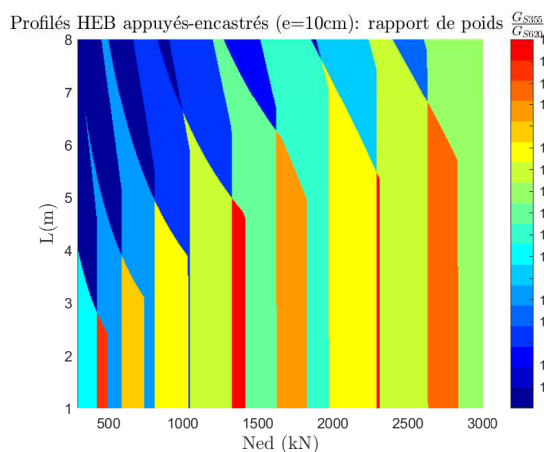


(c) HEB, appuyés-encastrés, e=1cm, S620

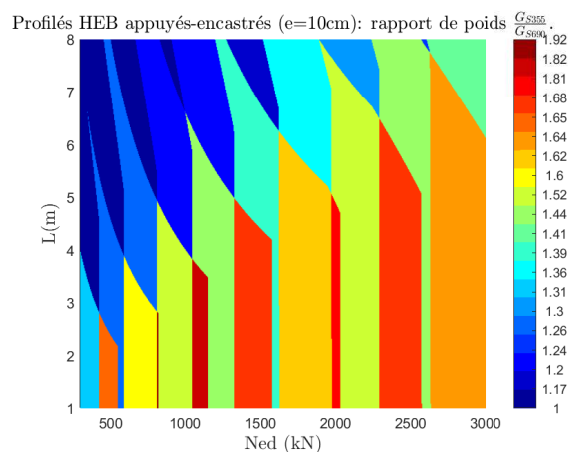


(d) HEB, appuyés-encastrés, e=1cm, S690





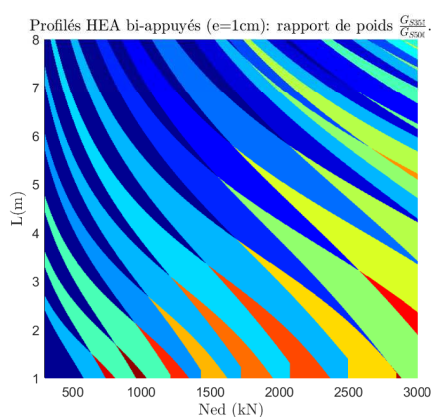
(c) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S620



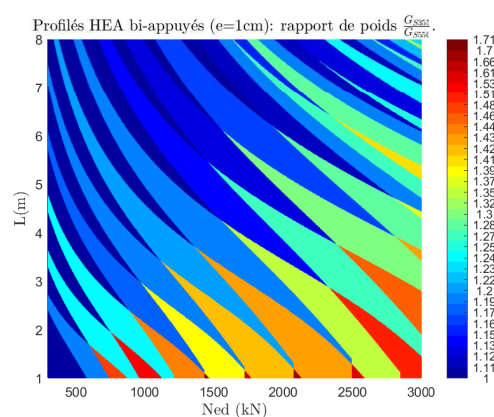
(d) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S690

D.2 Flambement dans l'espace (selon y et z) et sans déversement

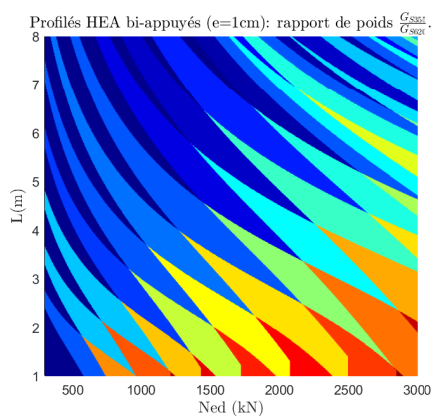
Profils HEA bi-appuyés



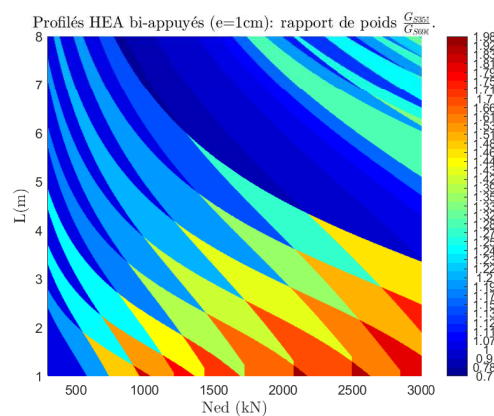
(a) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S500



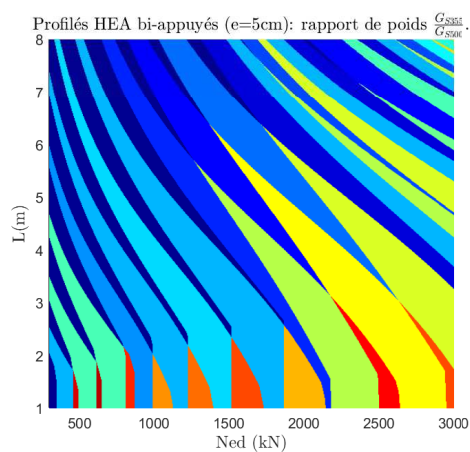
(b) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S550



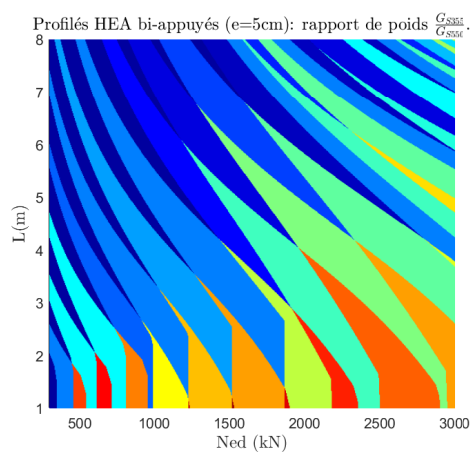
(c) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S620



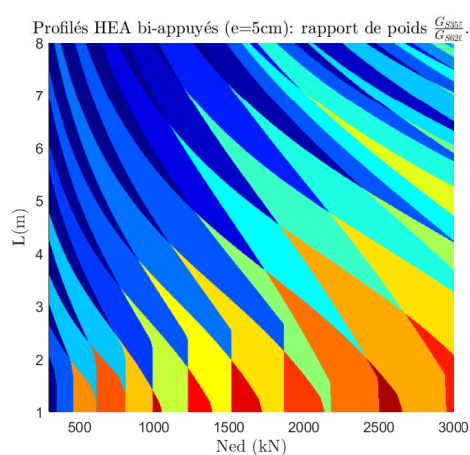
(d) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S690



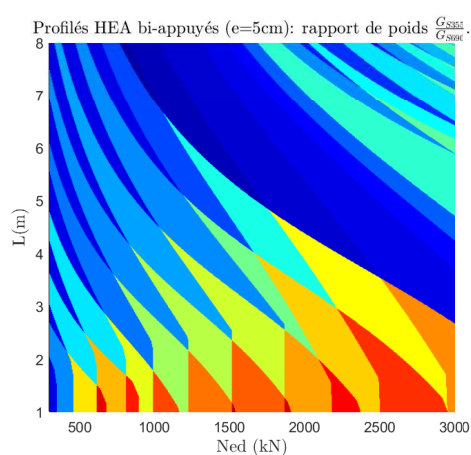
(a) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S500



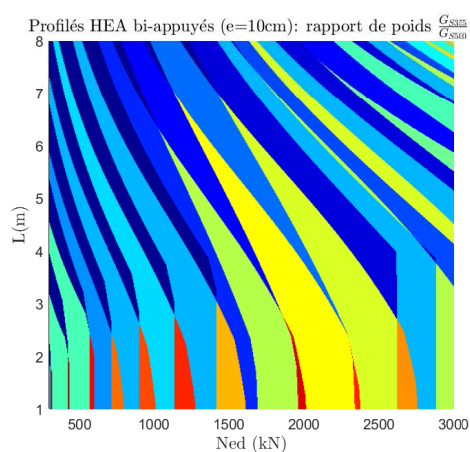
(b) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S550



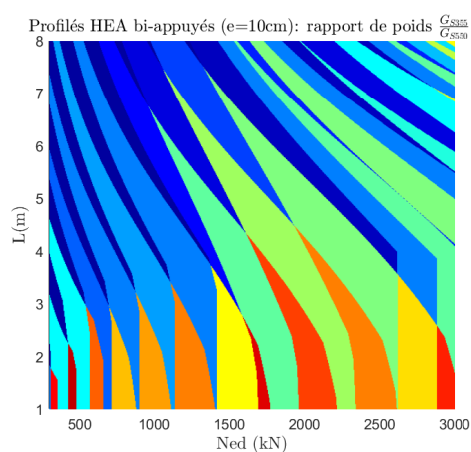
(c) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S620



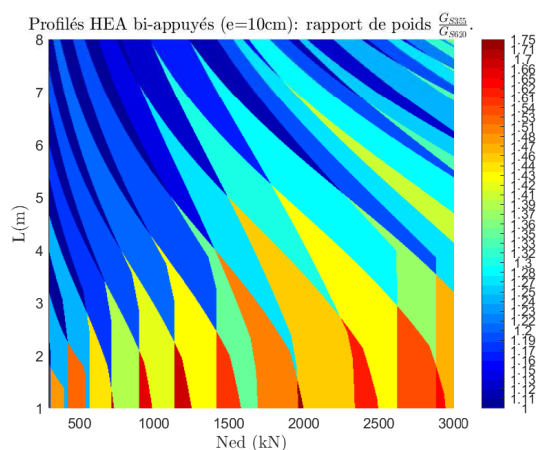
(d) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S690



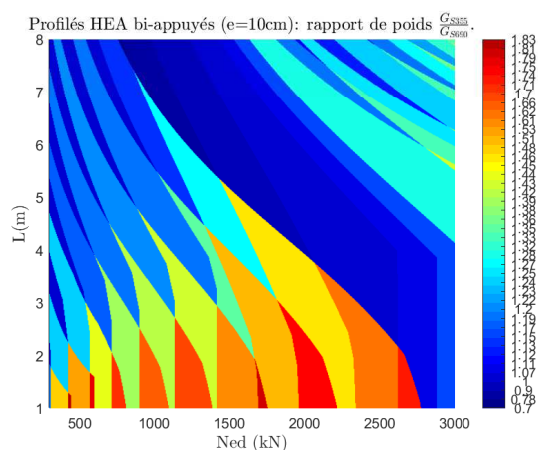
(a) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S500



(b) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S550

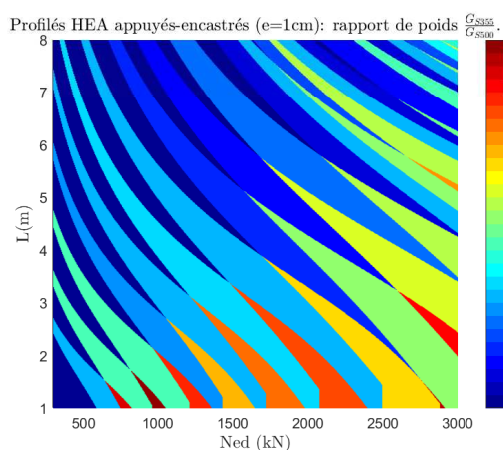


(c) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S620

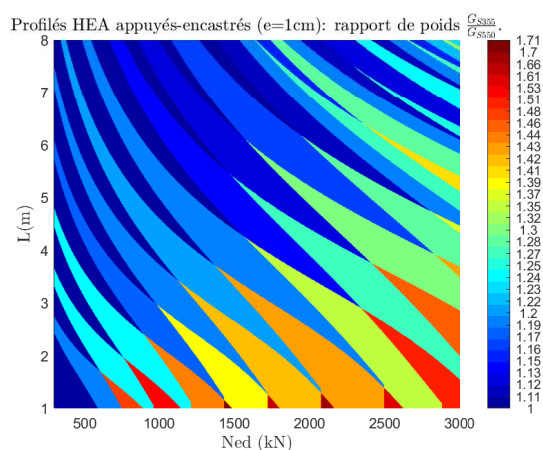


(d) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S690

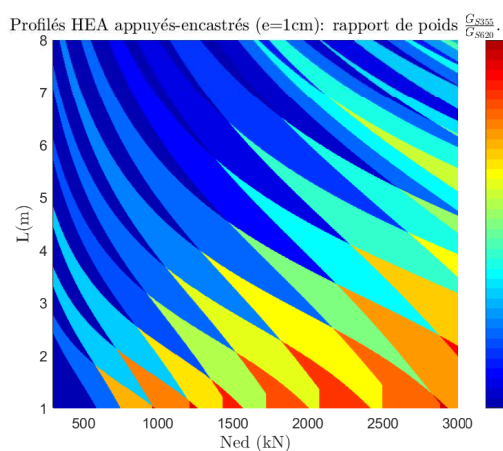
Profils HEA appuyés-encastrés



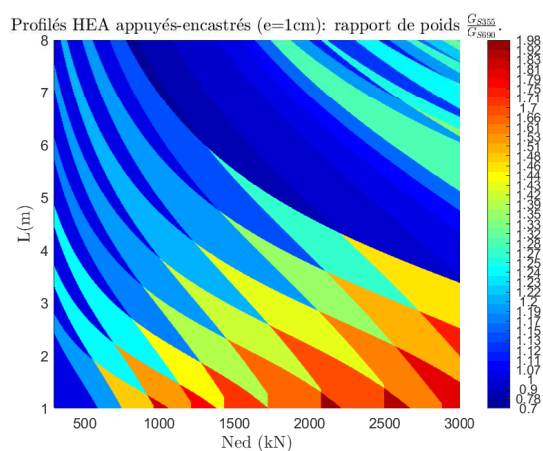
(a) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S500



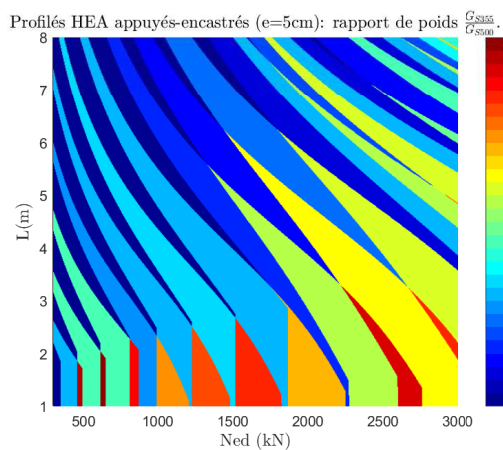
(b) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S550



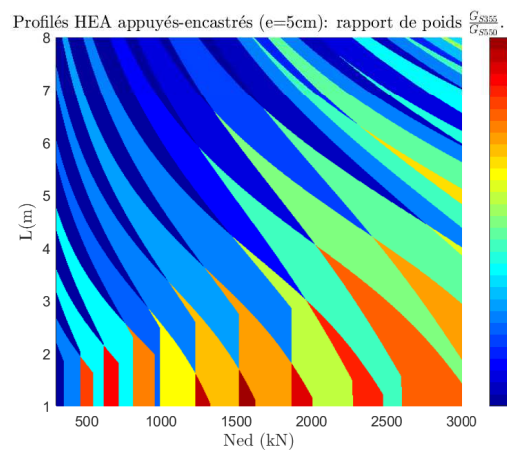
(c) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S620



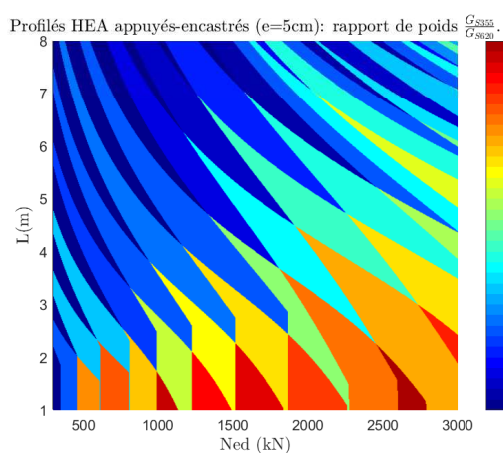
(d) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S690



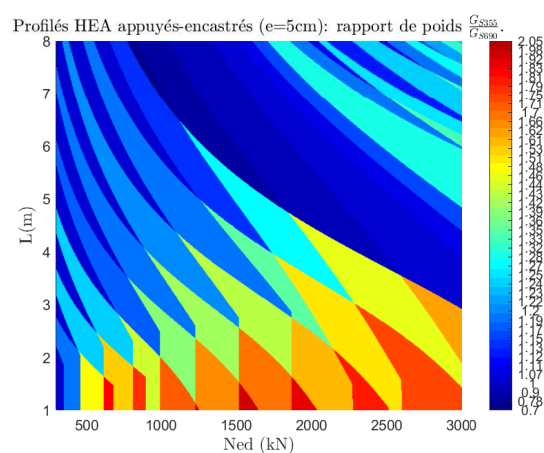
(a) HEA, appuyés-encastres, e=5cm, S500



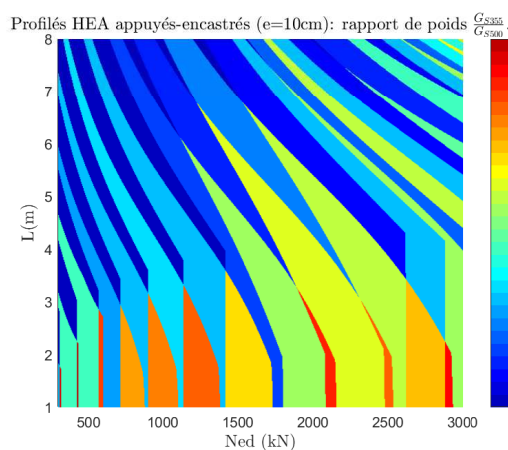
(b) HEA, appuyés-encastres, e=5cm, S550



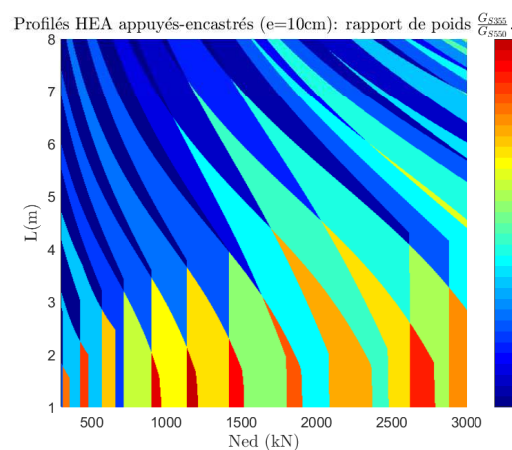
(c) HEA, appuyés-encastres, e=5cm, S620



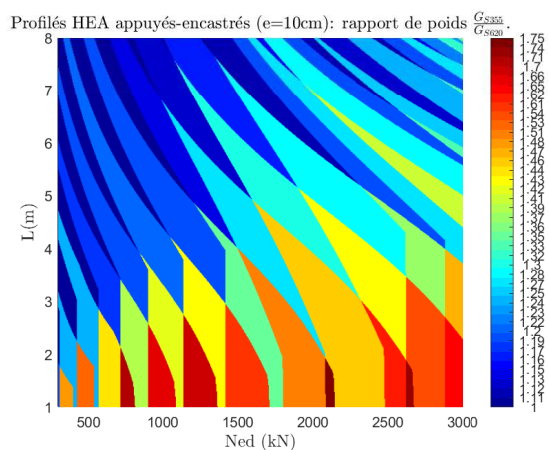
(d) HEA, appuyés-encastres, e=5cm, S690



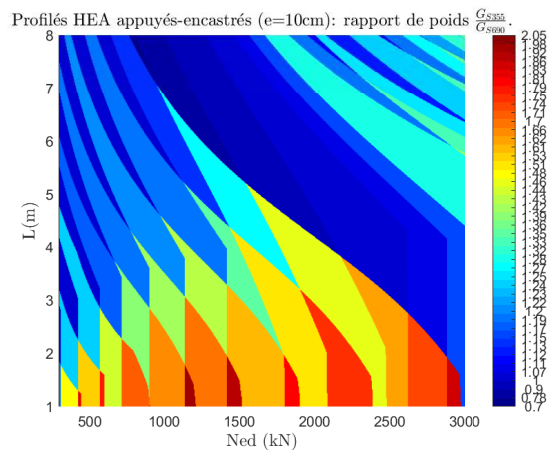
(a) HEA, appuyés-encastres, e=10cm, S500



(b) HEA, appuyés-encastres, e=10cm, S550

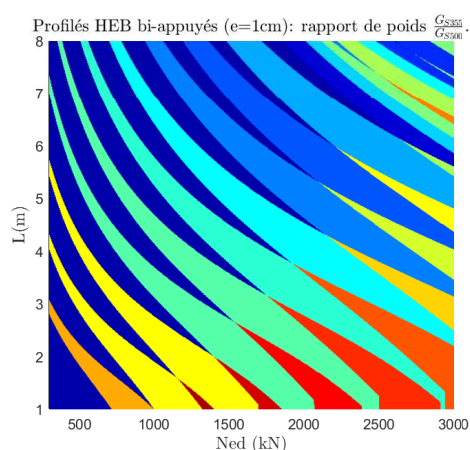


(c) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S620

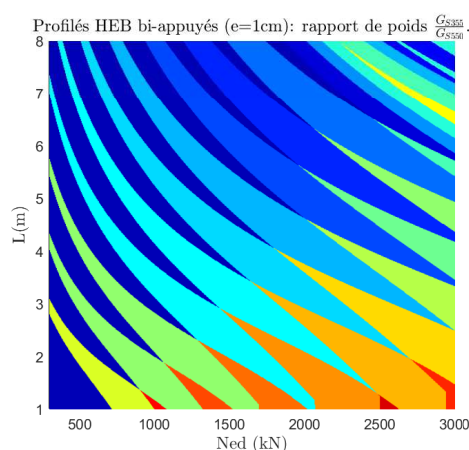


(d) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S690

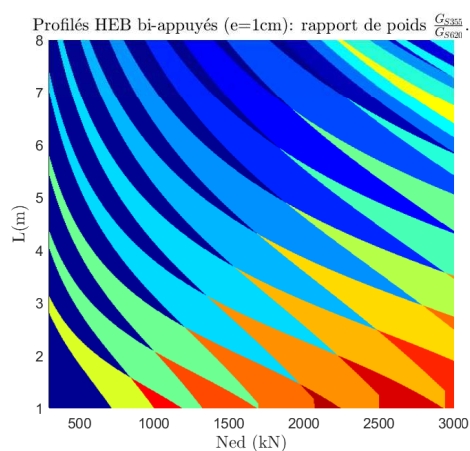
Profils HEB bi-appuyés



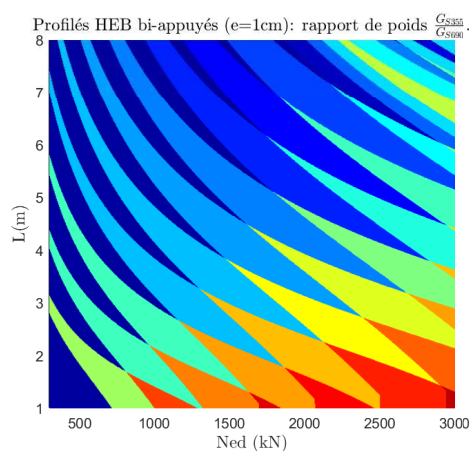
(a) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S500



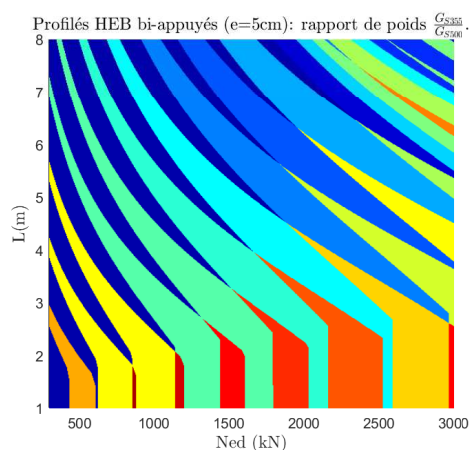
(b) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S550



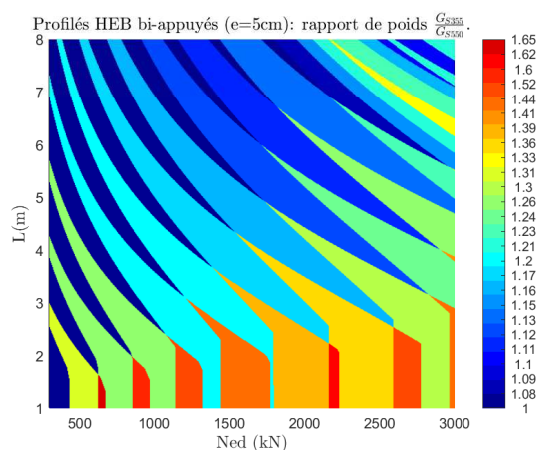
(c) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S620



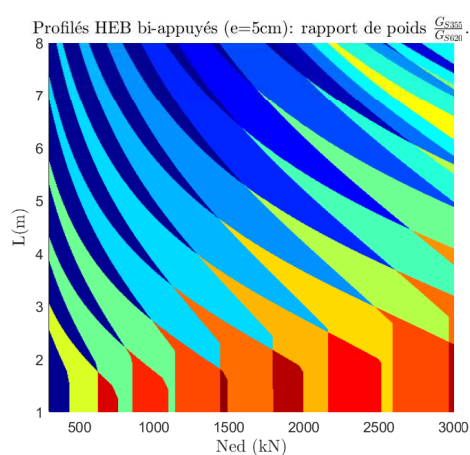
(d) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S690



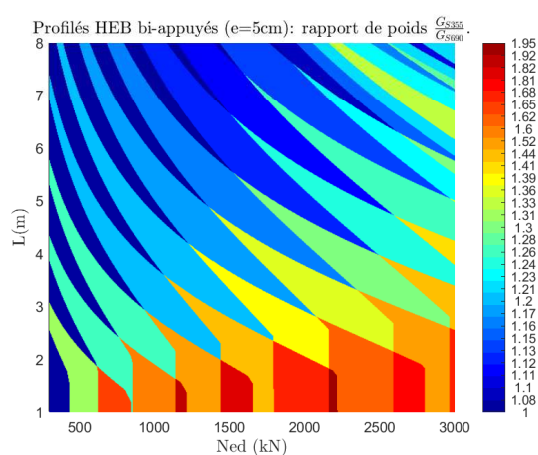
(a) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S500



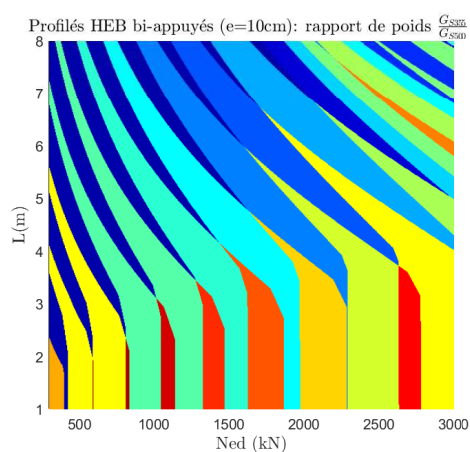
(b) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S550



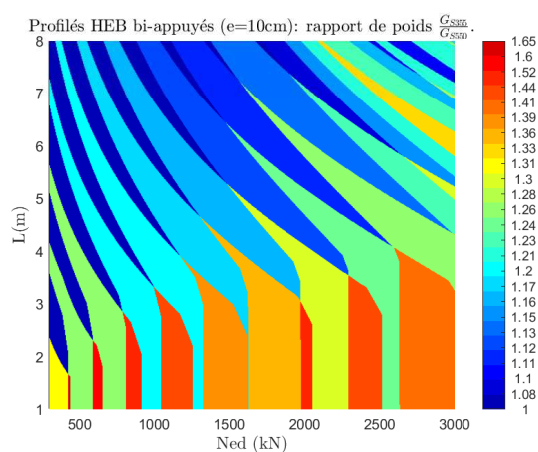
(c) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S620



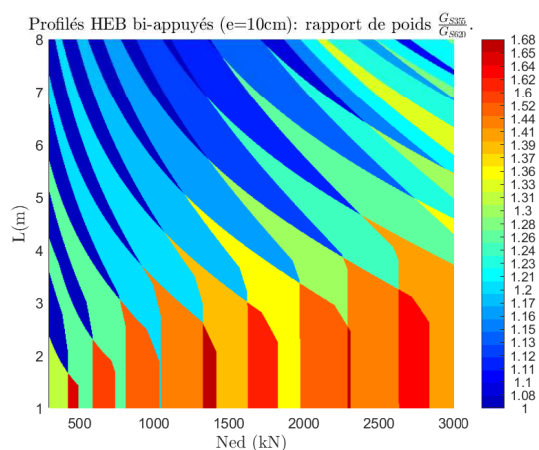
(d) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S690



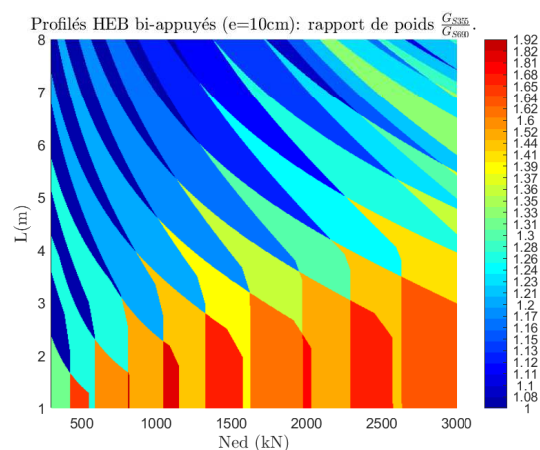
(a) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S500



(b) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S550

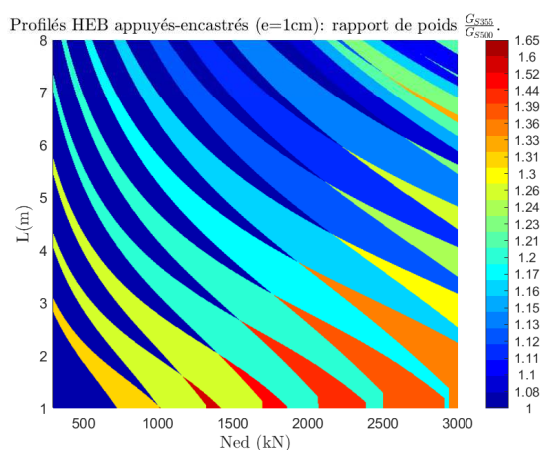


(c) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S620

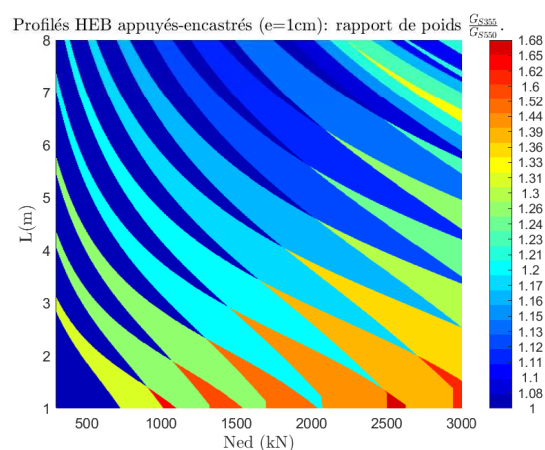


(d) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S690

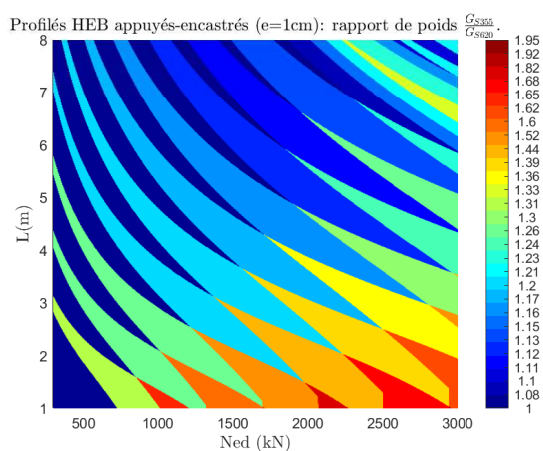
Profils HEB appuyés-encastés



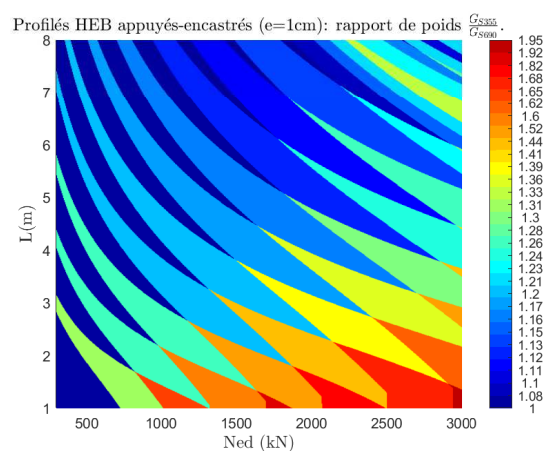
(a) HEB, appuyés-encastés, e=1cm, S500



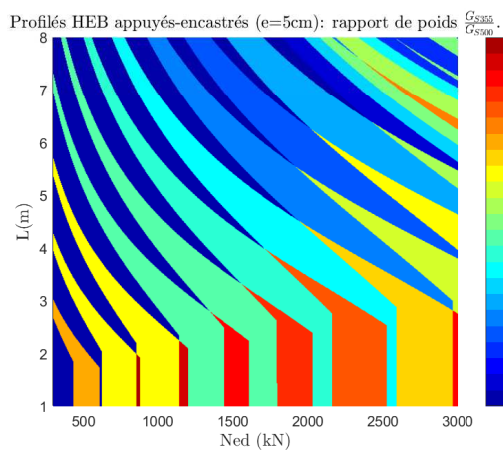
(b) HEB, appuyés-encastés, e=1cm, S550



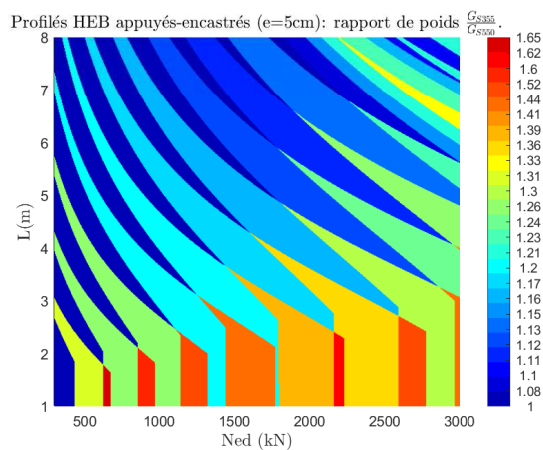
(c) HEB, appuyés-encastés, e=1cm, S620



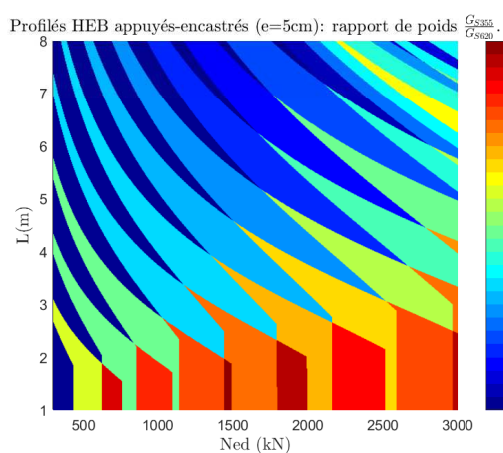
(d) HEB, appuyés-encastés, e=1cm, S690



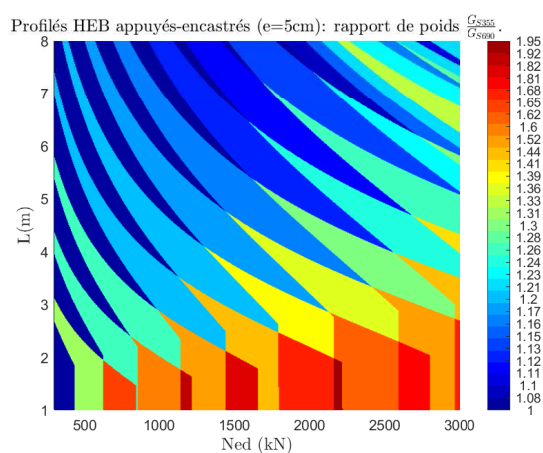
(a) HEB, appuyés-encastrés, e=5cm, S500



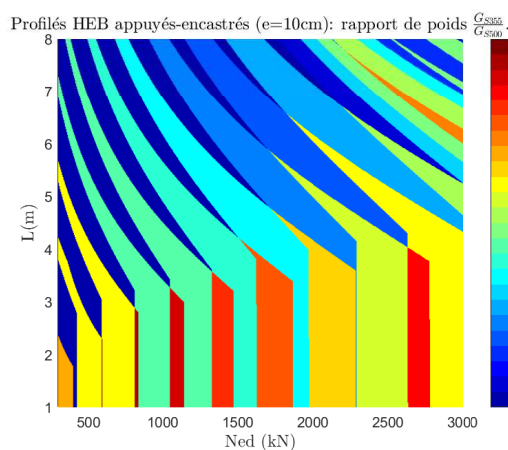
(b) HEB, appuyés-encastrés, e=5cm, S550



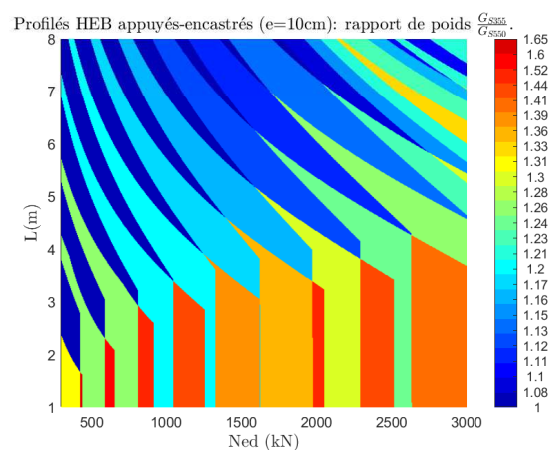
(c) HEB, appuyés-encastrés, e=5cm, S620



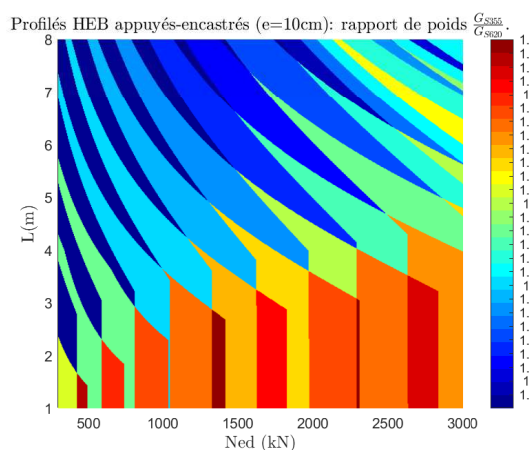
(d) HEB, appuyés-encastrés, e=5cm, S690



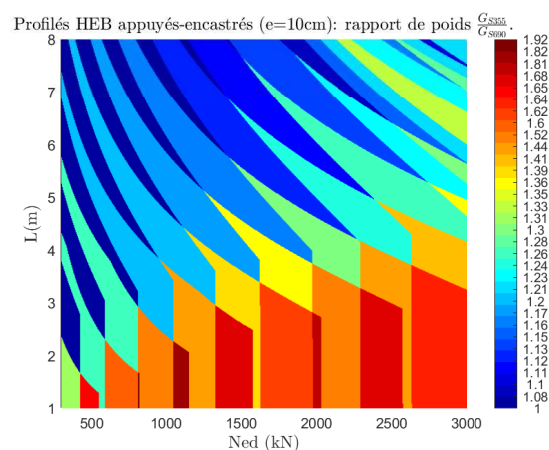
(a) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S500



(b) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S550



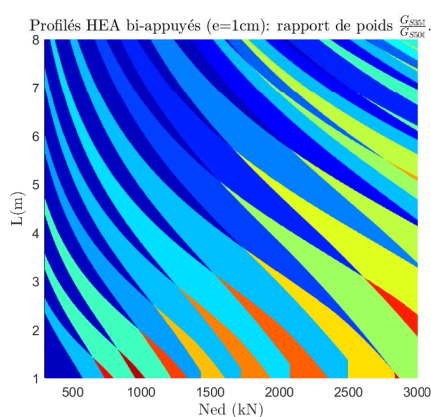
(c) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S620



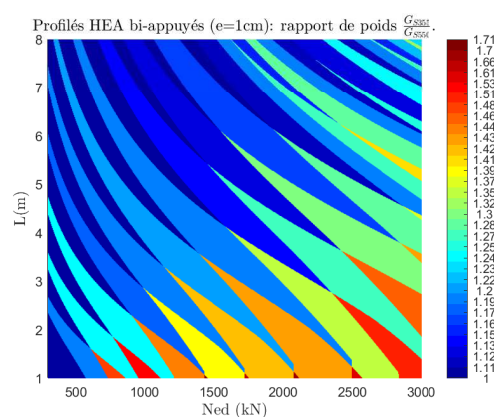
(d) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S690

D.3 Flambement dans l'espace (selon y et z) et avec déversement

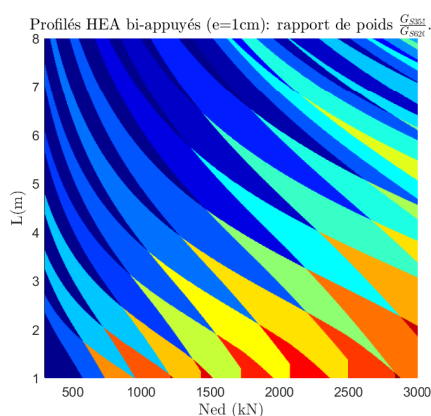
Profils HEA bi-appuyés



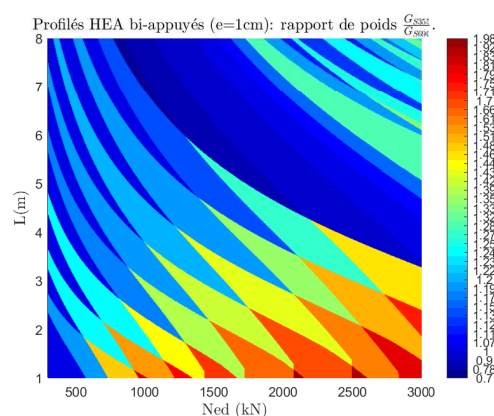
(a) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S500



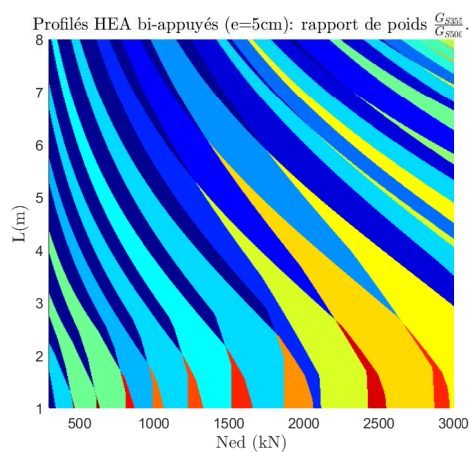
(b) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S550



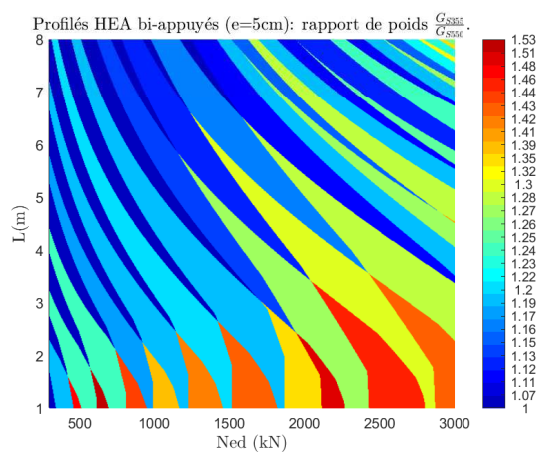
(c) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S620



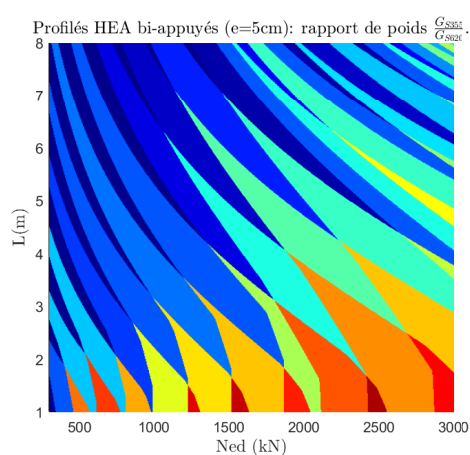
(d) HEA, bi-appuyés, e=1cm, S690



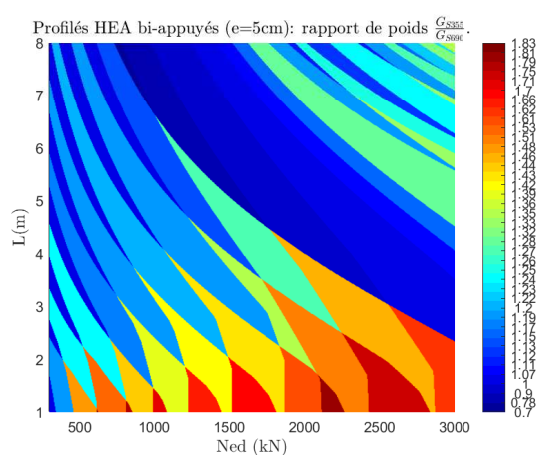
(a) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S500



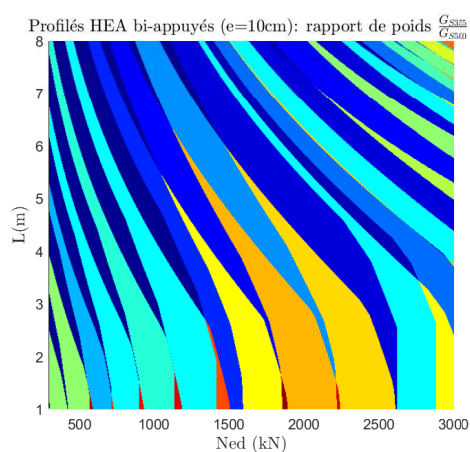
(b) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S550



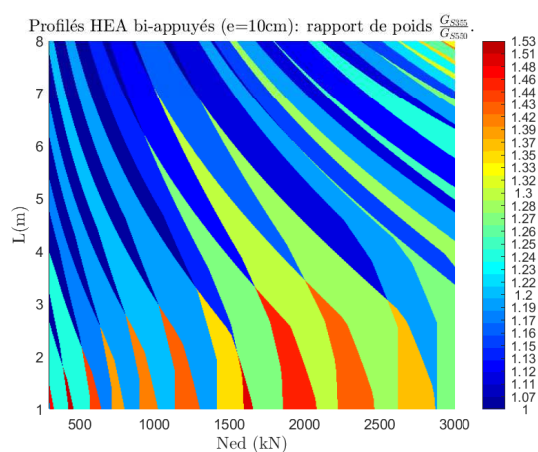
(c) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S620



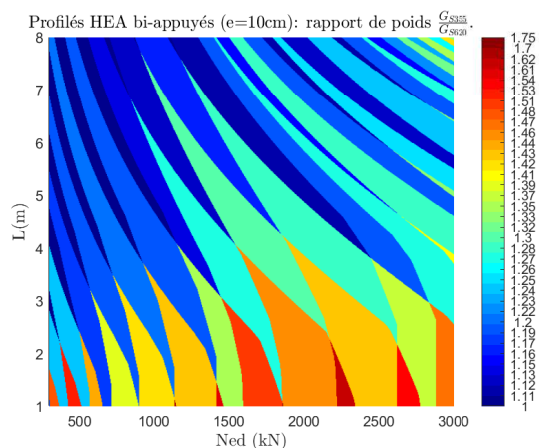
(d) HEA, bi-appuyés, e=5cm, S690



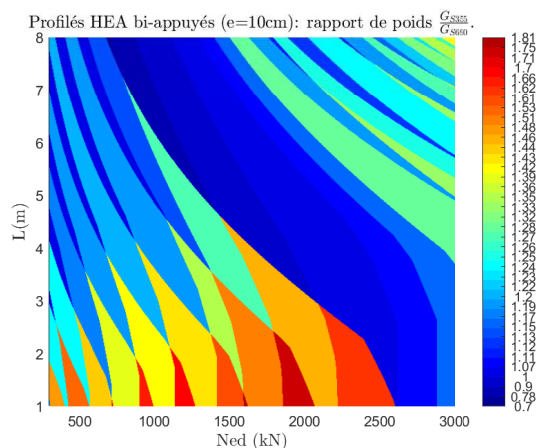
(a) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S500



(b) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S550

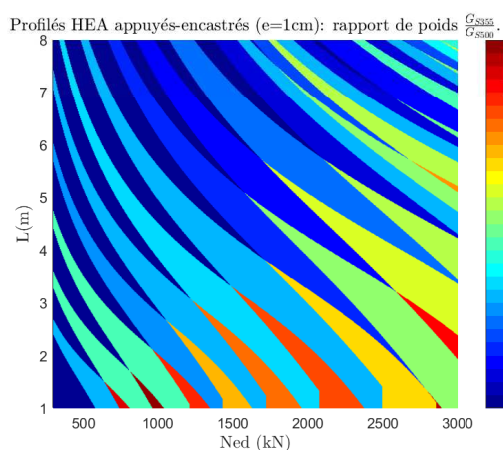


(c) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S620

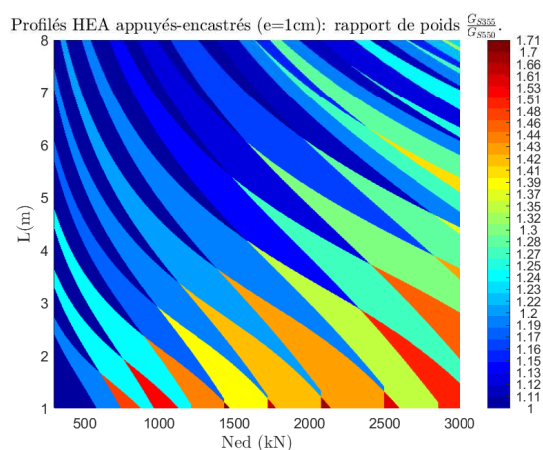


(d) HEA, bi-appuyés, e=10cm, S690

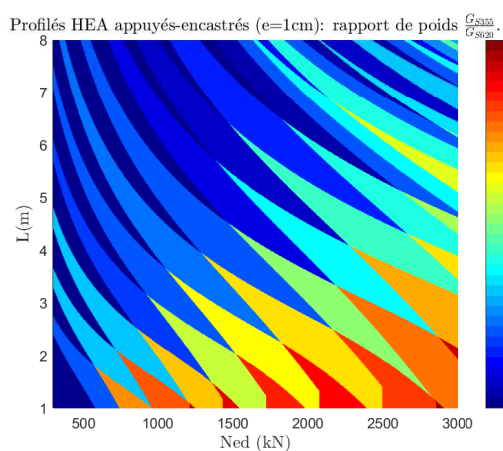
Profils HEA appuyés-encastrés



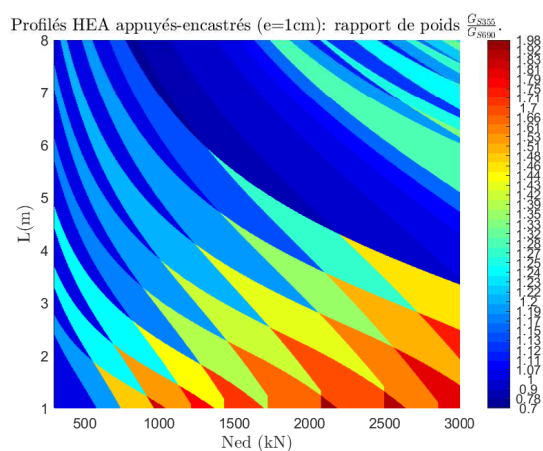
(a) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S500



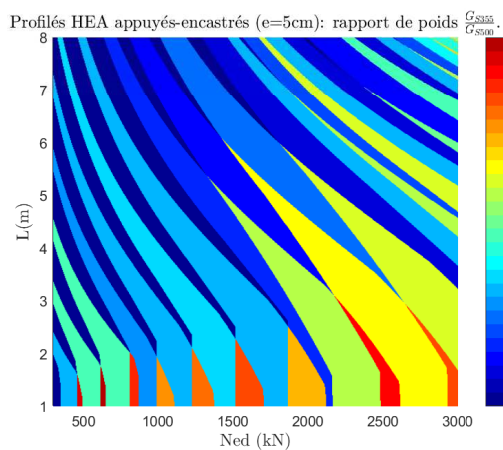
(b) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S550



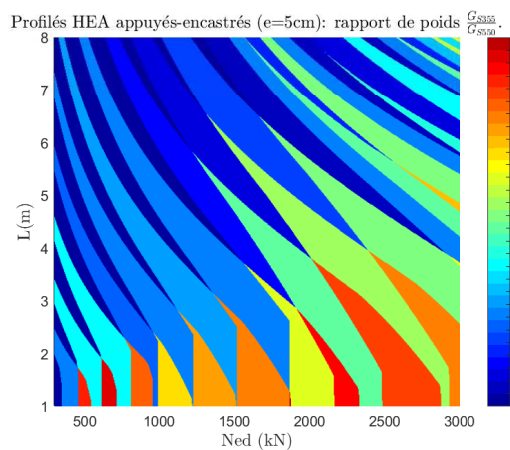
(c) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S620



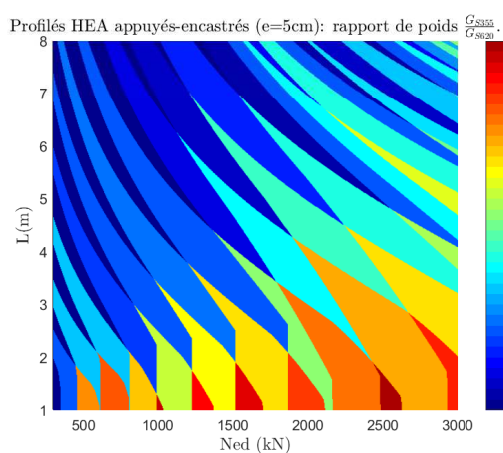
(d) HEA, appuyés-encastrés, e=1cm, S690



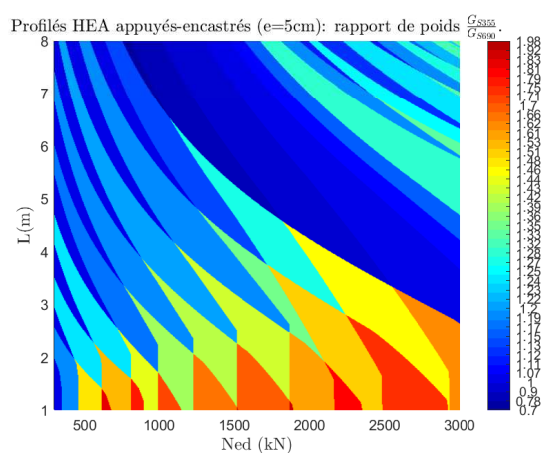
(a) HEA, appuyés-encastrés, e=5cm, S500



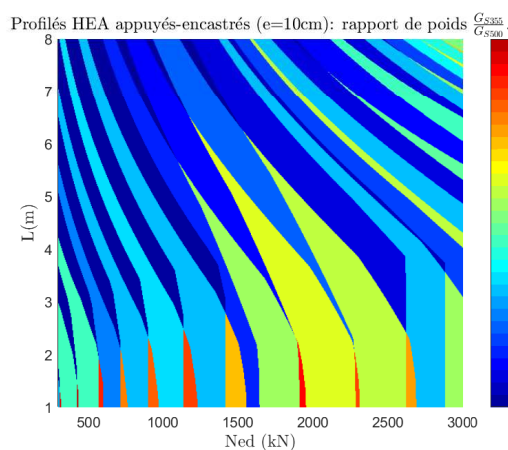
(b) HEA, appuyés-encastrés, e=5cm, S550



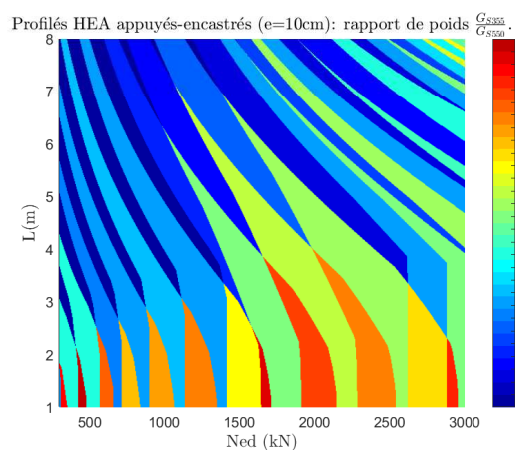
(c) HEA, appuyés-encastrés, e=5cm, S620



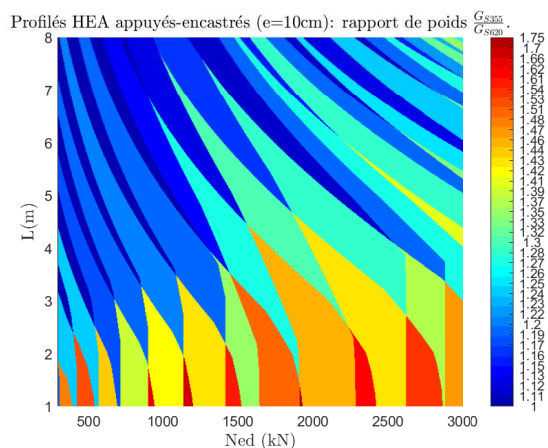
(d) HEA, appuyés-encastrés, e=5cm, S690



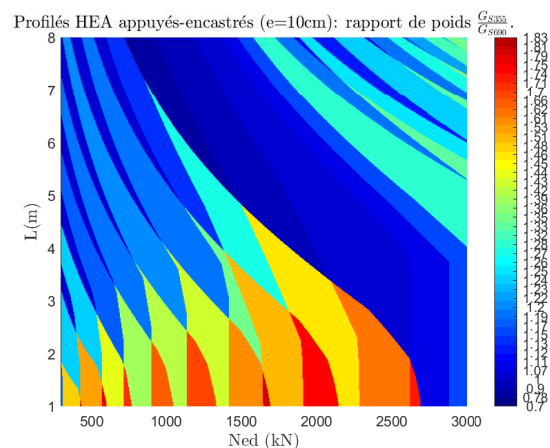
(a) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S500



(b) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S550

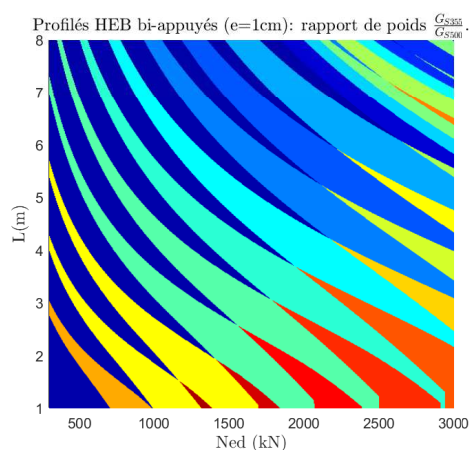


(c) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S620

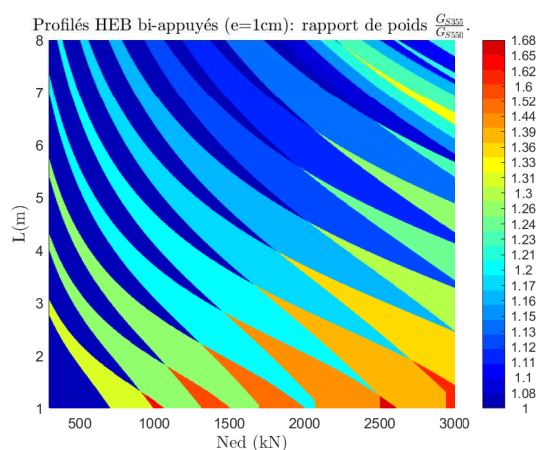


(d) HEA, appuyés-encastrés, e=10cm, S690

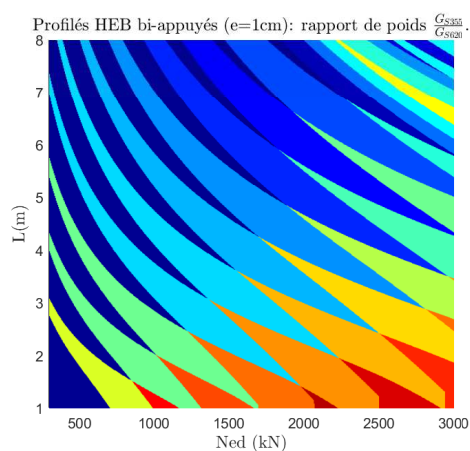
Profils HEB bi-appuyés



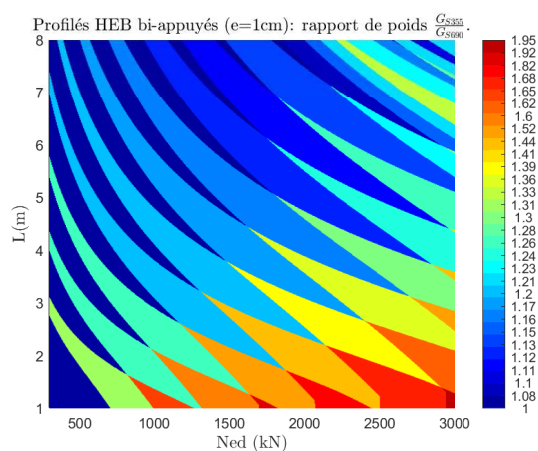
(a) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S500



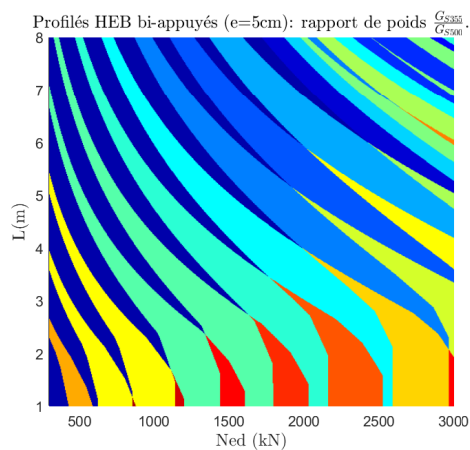
(b) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S550



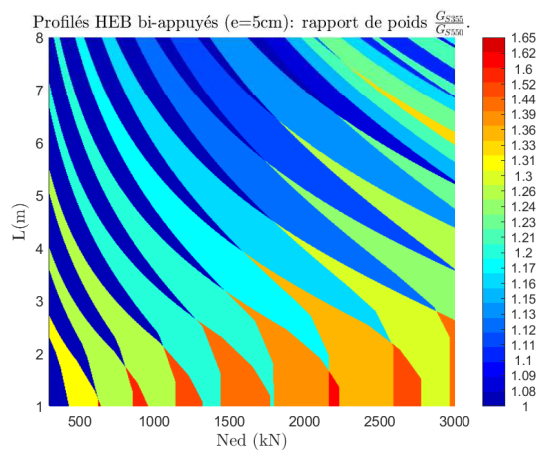
(c) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S620



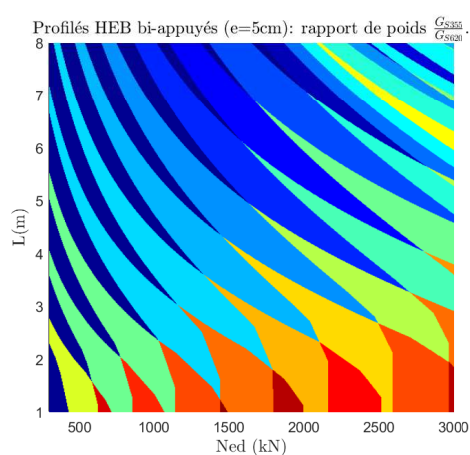
(d) HEB, bi-appuyés, e=1cm, S690



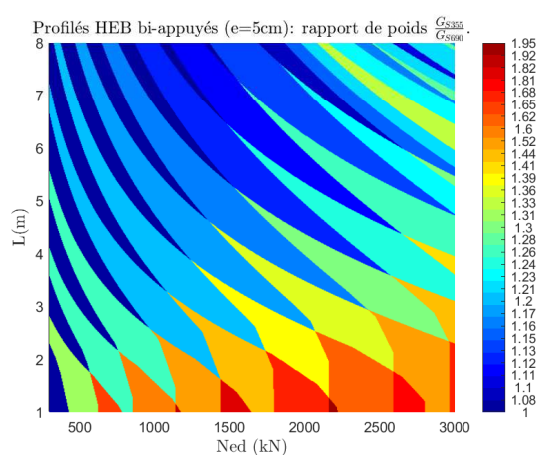
(a) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S500



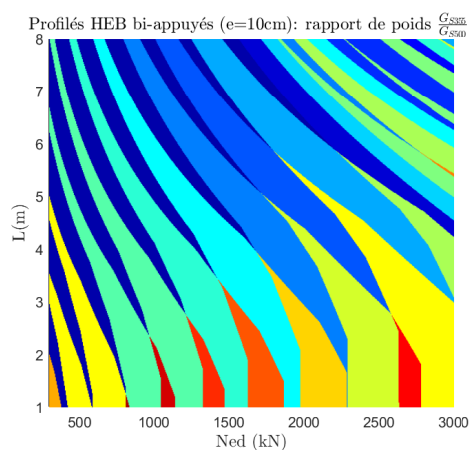
(b) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S550



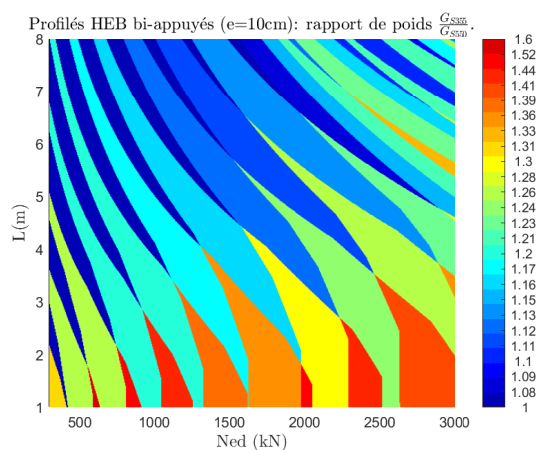
(c) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S620



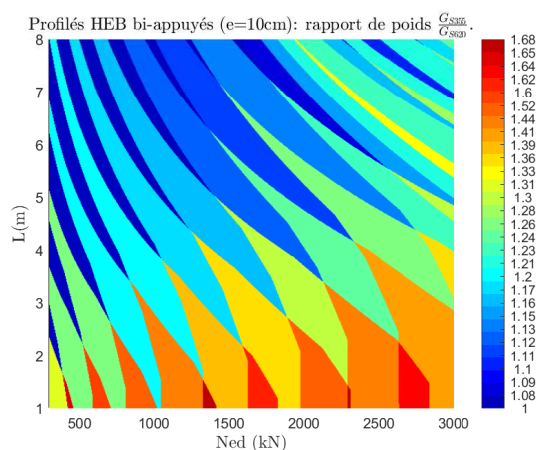
(d) HEB, bi-appuyés, e=5cm, S690



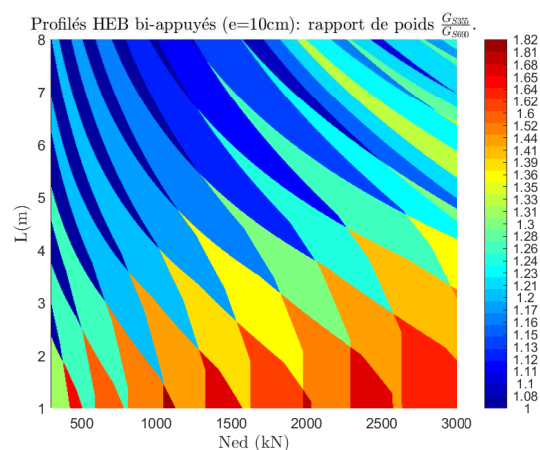
(a) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S500



(b) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S550

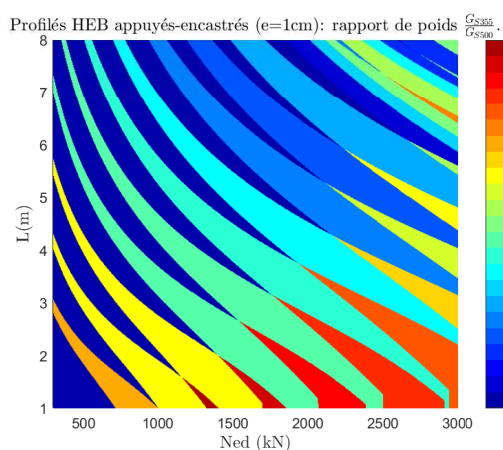


(c) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S620

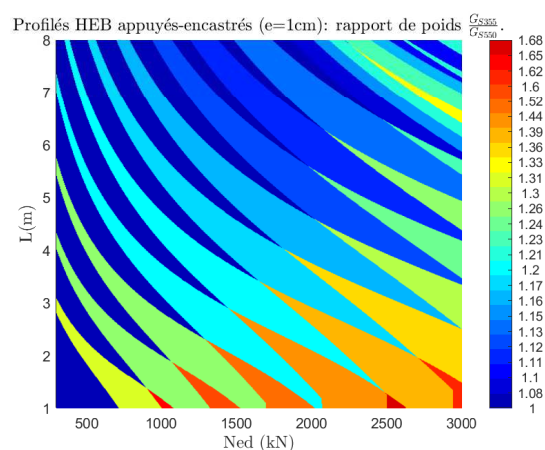


(d) HEB, bi-appuyés, e=10cm, S690

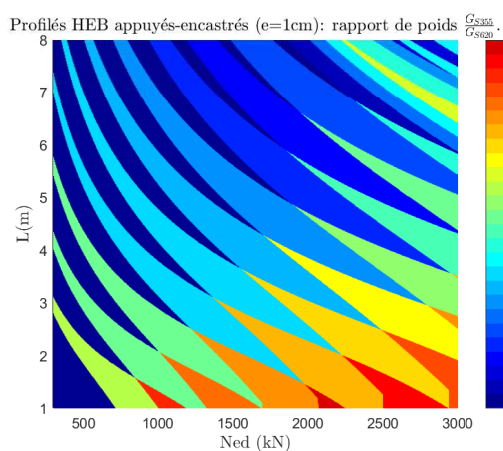
Profils HEB appuyés-encastés



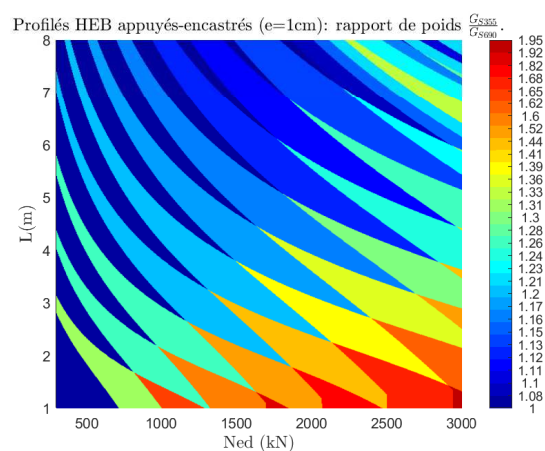
(a) HEB, appuyés-encastés, e=1cm, S500



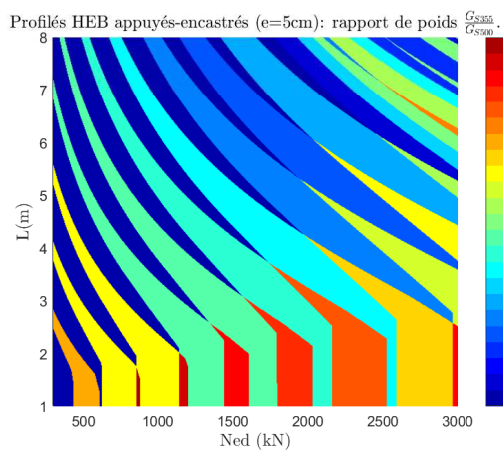
(b) HEB, appuyés-encastés, e=1cm, S550



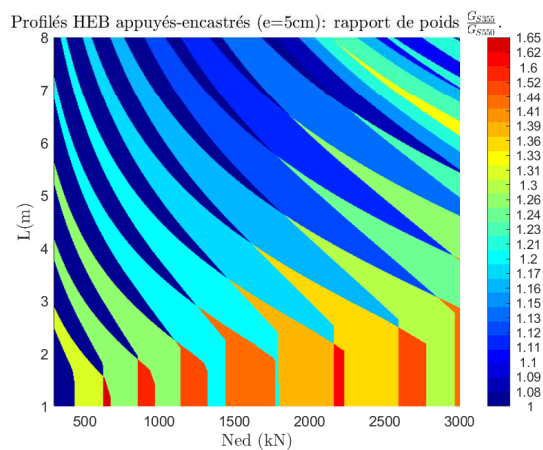
(c) HEB, appuyés-encastés, e=1cm, S620



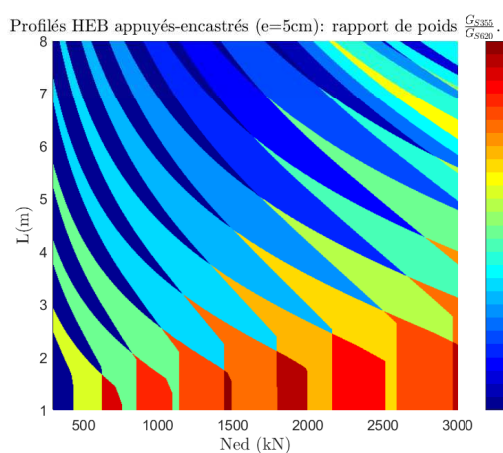
(d) HEB, appuyés-encastés, e=1cm, S690



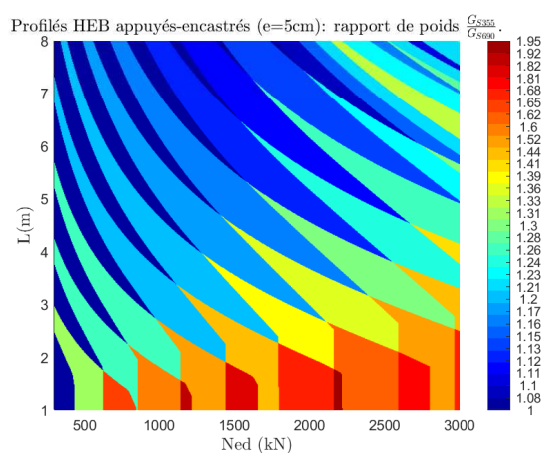
(a) HEB, appuyés-encastrés, e=5cm, S500



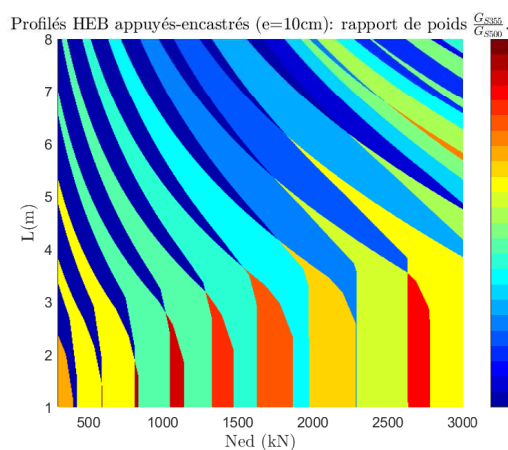
(b) HEB, appuyés-encastrés, e=5cm, S550



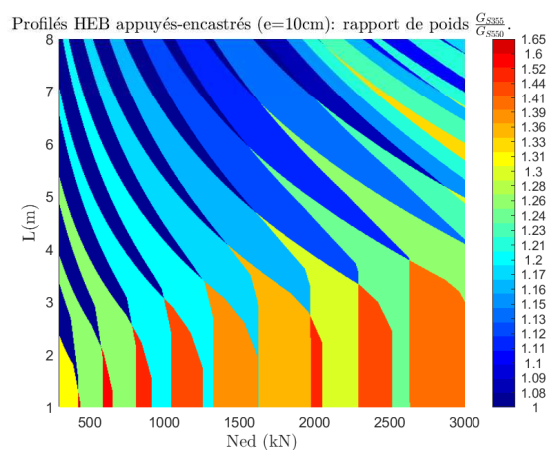
(c) HEB, appuyés-encastrés, e=5cm, S620



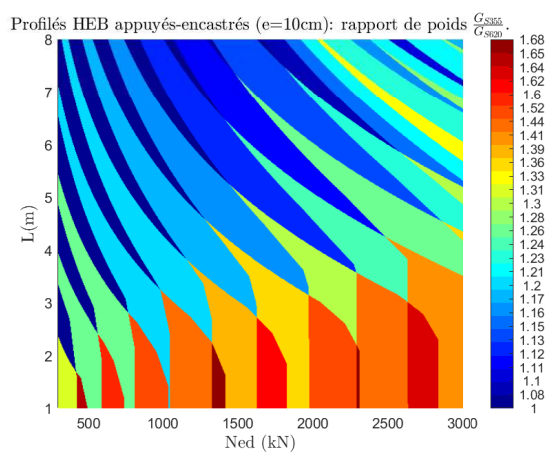
(d) HEB, appuyés-encastrés, e=5cm, S690



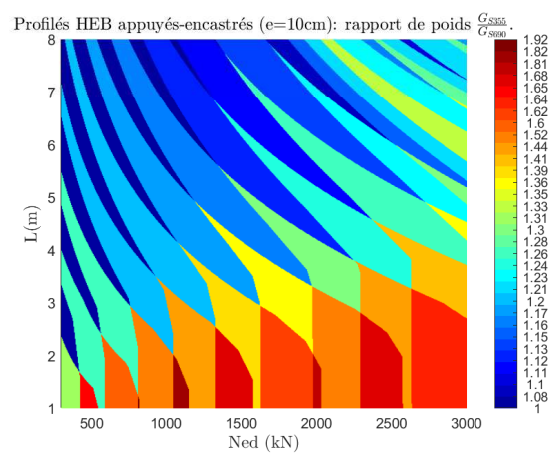
(a) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S500



(b) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S550



(c) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S620



(d) HEB, appuyés-encastrés, e=10cm, S690