

Stabilité des éléments et cadres en construction métallique

Programme du cours, contenu et méthodes d'enseignement théorique et pratique

Document submitted in fulfillment of Article 8°, Alinea b) from the Portuguese

Decreto Lei n° 239/2007

Table des matières

<i>Introduction</i>	3
<i>Encadrement et objectifs du cours</i>	3
<i>Programme, contenu et méthodes d'enseignement, d'apprentissage</i>	3
<i>Contenu des cours</i>	4
<i>Flambage</i>	4
<i>Flambage de cadres</i>	5
<i>Déversement</i>	5
<i>Voilement</i>	6
<i>Stratégie, méthodes pédagogiques</i>	6
<i>Contrôle de l'apprentissage</i>	7
<i>Contrôle de l'apprentissage</i>	7
<i>Littérature recommandée</i>	8
<i>ANNEXE 1 : Halle utilisée pour les exercices</i>	9
<i>ANNEXE 2 : EXERCICE Cadre non-tenu</i>	11
<i>ANNEXE 3 : EXERCICE Cadre non-tenu - CORRIGE</i>	14

Introduction

Je considère prioritaire de former des ingénieurs en génie civil compétents dans les domaines-clés de la construction métallique que sont la stabilité, les assemblages, la construction mixte et la fatigue. Je suis intéressé par un rapprochement entre étudiants architectes et étudiants ingénieurs. J'aimerais améliorer l'intérêt des étudiants d'architecture pour le fonctionnement des structures et vice-versa pour la forme des structures pour les étudiants en génie civil.

Ce document présente un cours qui peut parfaitement s'intégrer dans le programme actuel des cours enseignés dans le domaine de la mécanique des structures du département de génie civil de l'université de Coimbra. Il présente tous les éléments nécessaires au développement du cours, soit les objectifs du cours, son contenu, ainsi qu'une description des méthodes d'enseignement théorique et pratique utilisées.

La discipline sélectionnée concerne **la stabilité des éléments et des cadres en construction métallique**. Il s'agit d'un cours donné sur un semestre en accord avec les principes de la convention dite « de Bologne », ceci à raison de 3 heures par semaine (2 h de théorie et 1 h d'exercices encadrés). Le cours se déroule sur un total de 14 semaines et correspond aux critères d'un cours à 3 crédits ETCS. Il s'agit d'un cours de niveau Bachelor (BS), pour les étudiants en 3^{ème} année de génie civil. Je précise ici qu'il n'a pas été développé pour être donné tel quel aux étudiants de niveau BS en architecture.

Encadrement et objectifs du cours

Le cours se scinde en leçons de théorie et séances d'exercices. Les leçons de théorie se font sous forme de cours ex-cathedra. Les séances d'exercices sont encadrées par le professeur ainsi que par des assistants. Le programme, les thèmes abordés et les exercices correspondants sont donnés sous forme de tableau à la section suivante.

Les prérequis sont les cours de base de statique et mécanique des solides, ainsi qu'un cours sur le dimensionnement en section des éléments métalliques et mixtes. Certaines notions supposées déjà connues mais importantes seront cependant rapidement revues, telles que par exemple, le flambage par bifurcation (Euler) ou la notion de coefficient d'équivalence en construction mixte ($n_{el} = E_s / E_c, \dots$).

L'objectif du cours est l'acquisition de savoirs et de compétences dans le domaine clé de l'analyse des structures en acier qu'est la stabilité, ou plutôt la prévision de la charge ultime qui peut être appliquée à une structure lorsque la rupture est provoquée par un phénomène d'instabilité. Ces notions sont une base indispensable pour tous les cours et les projets dans le domaine des structures.

Programme, contenu et méthodes d'enseignement, d'apprentissage

La tableau ci-après donne un résumé des leçons et exercices sur le semestre (14 semaines).

Cours	Enseign.	Thèmes	Sujets abordés	Exercices
1	Prof.	Flambage 1	Bifurcation, divergence Résistance ultime sous N	
Ex				E1a, flambage Euler
2	Prof.	Flambage 2	Résistance ultime sous combinaison d'efforts	
Ex				E1b, flambage poteau
3	Prof.	Mixte 1	Introduction poteau mixte Rappels, section équivalente, poutre mixte Poteau mixte sous N	
Ex	Assist.			E2a, poteau mixte

4	Prof.	Mixte 2	Poteaux mixtes sous N+M	
Ex				E2b, poteau mixte
5	Prof.	Cadres	Système porteurs et descente de charges Comportement structural Calcul statique (EE, EP, PP)	
Ex	Assist.			E3a, cadre tenu
6	Prof.	Cadres, stabilité 1	Soumis à forces nodales, non-nodales Eval. longueurs de flambage, effet contreventement	
Ex	Assist.			E3b, cadre tenu
7	Prof.	Cadres, stabilité 2	Dimensionnement Calcul efforts intérieurs	
Ex				E4a, cadre non-tenu
8	Prof.	Cadres, stabilité 3	Classification cadre Eval. efficacité CV	
Ex	Assist.			E4b, cadre non-tenu
9	Prof.	Déversement 1	Théorie lin.-élast. Modèle bifurcation	
Ex				E5a, déversement
10	Prof.	Déversement 2	Essai au laboratoire (déversement élastique)	
Ex	Assist.			Rapport d'essai
11	Prof.	Déversement 3	Résistance ultime	
Ex	Assist.			E5b, déversement
12	Prof.	Voilement 1	Théorie lin.-élast.	
Ex	Assist.			E6a, voilement
13	Prof.	Voilement 2	Résistance ultime	
Ex				E6b, voilement
14	Prof.	Réserve, récapitulation		
Ex				Prépa. à l'examen, réponses aux questions

Contenu des cours

Dans ce cours, les problèmes de stabilité sont classés en plusieurs catégories, suivant que l'on étudie une structure dans son ensemble ou les différents éléments qui la composent. Les sujets sont présentés à la suite par ordre de complexité croissante, soit :

- Stabilité d'une barre (flambage) : on traite de l'analyse d'un élément linéaire à axe rectiligne (barre droite) soumis à des actions conduisant à des sollicitations d'effort normal N et une combinaison d'effort normal et de moment de flexion ($N+M$).
- Stabilité d'une poutre (déversement) : analyse d'un élément linéaire à axe rectiligne soumis à des actions conduisant à une sollicitation de moment de flexion M .
- Stabilité d'un ensemble d'éléments linéaires et plans (flambage de cadres) : étude des cadres bi- et tridimensionnels.
- Stabilité d'une plaque ou d'une coque (voilement): analyse de plaques sollicitées par des charges agissant dans leur plan.

Décrivons maintenant d'une manière plus détaillée le contenu de chaque thème.

Flambage

On commence par examiner le phénomène d'instabilité qu'est le flambage des barres comprimées, en mettant en évidence les principaux paramètres qui régissent ce phénomène.

Pour atteindre ce but, les points suivants sont traités :

- présentation (rappel) de la théorie linéaire du flambage élastique, par bifurcation, longueurs de flambage en fonction des conditions d'appui ;
- théorie linéaire du flambage élastique avec déformée initiale, par divergence ;
- étude de la résistance ultime au flambage d'une barre réelle, imperfections des barres industrielles, courbes de flambage européennes (origine et courbes actuelles selon l'Eurocode 3).

Ensuite, on traite du dimensionnement de poteaux et de poutres-poteaux de la manière suivante :

- principes de dimensionnement des barres comprimées, bases de vérification de la sécurité structurale et de l'aptitude au service ;
- étude des barres comprimées formées d'un profil laminé. Effet d'un effort normal, celui d'une interaction entre un effort normal et un ou des moments de flexion (déversement empêché) ainsi que le flambage par flexion et torsion;
- étude des cas particulier que sont les barres étrésillonnées, les poteaux mixtes et les éléments à parois minces, avec un accent sur les poteaux mixtes comprimés et comprimés-fléchis.

Flambage de cadres

Ce thème comprend le calcul statique des cadres et leur stabilité. Après avoir exposé le comportement structural d'un cadre, les différentes méthodes de calcul des efforts intérieurs (élastique et plastique) sont présentées. Puis les méthodes permettant de prendre en compte la stabilité des éléments comprimés sont expliquées. Enfin, la procédure de dimensionnement des cadres à la sécurité structurale est présentée à l'aide d'un exemple numérique. La matière est structurée comme suit :

- comportement structural d'un cadre : Influence de la rigidité des éléments, situations élémentaires d'un cadre, imperfections, effets des non-linéarités géométriques et matérielles, classification des cadres (contreventé et non-contreventé, rigide et souple) ;
- calcul statique des cadres : rappel des méthodes de détermination élastique et plastique des efforts intérieurs ;
- stabilité élastique des cadres : rappel de la théorie du flambage, cadre idéal soumis à des forces nodales, à des forces non-nodales, évaluation des longueurs de flambage, effet d'un contreventement de toiture ;
- procédure de dimensionnement : prédimensionnement, méthode de détermination des efforts intérieurs, calcul des efforts intérieurs au premier ordre ou au second ordre, exemple de vérification de la sécurité structurale.

Déversement

On commence par faire une analogie entre le flambage d'un montant en compression et le déversement d'une poutre en flexion (dont une partie est comprimée et tend à se dérober à cet effort). On présente la matière de manière à mettre en évidence les principaux paramètres qui régissent le déversement. La matière est structurée comme suit :

- présentation de la théorie linéaire du déversement élastique. Principe du déversement et théorie pour le cas de base du déversement d'une poutre simple en flexion pure.

Moment critique de déversement élastique et l'influence sur celui-ci des conditions d'appui, du point d'application de la charge et des appuis intermédiaires. Introduction au logiciel LTBEAM (lit.), logiciel interactif et graphique, utilisation du logiciel par les étudiants pour la compréhension du phénomène et de l'influence des paramètres..

- étude de la résistance ultime au déversement d'une barre réelle. Principe de calcul du moment de déversement. Calcul simplifié du moment critique de déversement élastique pour les poutres en double-té bisymétriques. Calcul du moment de déversement à l'aide d'une formulation similaire à celle du flambage, dont on réutilise les courbes. Influence de la distribution des moments sur le moment de déversement.
- cas particulier du flambage hors plan (selon axe d'inertie faible) avec déversement non empêché.

Voilement

On examine le phénomène de voilement de plaques comprimées, en mettant en évidence les principaux paramètres qui régissent le phénomène. En guise d'introduction, on fait la comparaison entre la résistance au flambage d'une plaque libre sur ses bords latéraux et la même plaque appuyée sur ses quatre bords, ceci afin de mettre en évidence l'effet favorable des fibres tendues perpendiculaires aux efforts de compression.

La présentation de la matière est structurée de manière similaire aux précédents thèmes, soit :

- présentation de la théorie linéaire du voilement élastique (par bifurcation). Contrainte critique de voilement élastique et coefficient de voilement. Influence sur cette contrainte critique du nombre de cloques de voilement, des conditions de bord, du type de sollicitation. Fonction d'un raidisseur soudé sur la plaque et position(s) optimale(s) suivant le nombre de raidisseurs et les conditions de chargement. Introduction au logiciel EBTPATE (lit.), logiciel interactif et graphique, utilisation du logiciel par les étudiants pour la compréhension du phénomène et de l'influence des paramètres.
- étude de la résistance ultime au voilement d'une plaque réelle. Comportement d'une plaque mince comprimée, réserve post-critique. Détermination de la largeur efficace et élancement limite. Détermination des limites fixées dans l'Eurocode 3 entre les classes de section 3 et 4.
- présentation de la résistance au voilement sous introduction de charges concentrées.

Stratégie, méthodes pédagogiques

Je m'intéresse aux questions de pédagogie d'enseignement et j'ai suivi, à ma propre initiative, les cours donnés dans ce domaine à l'EPFL par le CRAFT (Unité de support aux enseignants et Laboratoire de recherche sur les technologies de formation.). Je suis convaincu qu'un enseignant devrait donner aux étudiants une variété simultanée de différents moyens d'apprentissage (livres de référence, cours ex-cathedra, logiciels interactifs, séminaires, discussions, etc.).

Bien que les techniques modernes, telles que les présentations type Powerpoint et l'enseignement à distance avec internet soient très utiles, je pense qu'elles doivent être utilisées en plus des autres méthodes plus traditionnelles (livre) mais ne peuvent pas les remplacer. Par exemple, l'utilisation de l'enseignement par internet n'est, à mon avis, pas adéquat au niveau du Bachelor. Je pense par contre que l'utilisation de logiciels interactifs est une solution intéressante pour expliquer et comprendre des phénomènes comme les instabilités : flambage, déversement, voilement, en particulier si l'on ne peut pas les montrer au laboratoire. Car je considère qu'il faut un équilibre entre le théorique et l'expérimental tant

dans l'enseignement que dans la recherche. Je veux également, si possible, faire profiter les étudiants des laboratoires et les y emmener découvrir ce qui ne peut s'apprendre et se comprendre qu'en le voyant, le touchant, le faisant soi-même.

Pour un tel cours, de niveau Bachelor et donné à des grandes classes (typiquement plus de 100 étudiants), la méthode d'enseignement préférée pour les leçons de théorie est l'ex-cathedra. Les leçons sont agrémentées de présentations des phénomènes (maquettes, photos, vidéos), de questions aux étudiants (votes d'accord, pas d'accord, etc.) et de la présentation d'au minimum un essai, si possible deux, au laboratoire.

Les séances d'exercices sont encadrées par le professeur ainsi que par des assistants, mais doivent être terminés à la maison comme travail personnel. L'heure de contact par semaine prévue à l'horaire pour les exercices permet de répondre aux questions de compréhension de la donnée, de procédure de résolution ainsi que sur la théorie présentée en cours. Les sujets des exercices sont liés par le fait qu'ils se basent tous sur la même structure porteuse d'une halle industrielle existant réellement, structure dont on va étudier lors de chaque exercice le dimensionnement d'un autre élément. Ceci permet à chaque étudiant, en plus de la résolution de chaque exercice, de se constituer au final une « note de calcul » des différents éléments constituant une halle métallique. C'est aussi une bonne base pour un projet de semestre de conception et de calcul d'une structure métallique. Un exemple de halle et d'exercice sont donnés en annexe à ce document.

Les assistants pour les exercices sont des étudiants de niveau Master (de préférence un mélange d'étudiants MS de 1^{ère} et 2^{ème} année). Des séances de préparation entre le professeur et les étudiants-assistants sont organisées avant chaque exercice. De cette manière, quelques étudiants de Master ont la possibilité de se replonger dans la matière et de parfaire leurs connaissances avant d'être diplômés.

Pour terminer, je dirais que je suis convaincu que dans tout ingénieur compétent il y a un chercheur qui sommeille et qu'il ne faut surtout pas le lui faire oublier durant ces études. À long terme, ces ingénieurs sont les meilleurs, les plus innovateurs et ceux qui se feront les meilleurs défenseurs de la recherche !

Contrôle de l'apprentissage

Les exercices servent plusieurs buts : permettre aux étudiants la mise en pratique, la maîtrise des connaissances acquises, mais également permettre un contrôle continu du niveau d'acquisition des connaissances (voir sous section contrôle de l'apprentissage).

Afin de permettre des exercices à la fois didactiques et proches de la réalité, tous les exercices ont la même base, celle d'une halle réellement construite. Après avoir présenté la halle aux étudiants, ceux-ci vont durant chacun des exercices en étudier un point particulier pour soit dimensionner, soit vérifier, ou encore devoir calculer et vérifier les effets d'une transformation de la structure, tel que l'ajout d'un plancher intermédiaire. La donnée de la halle ainsi que deux exercices et leurs corrigés sont donnés en annexe à ce document.

Contrôle de l'apprentissage

L'objectif du contrôle est de vérifier les connaissances acquises et s'effectue donc de deux manières. Tout d'abord, les exercices doivent être rendus pour correction et évaluation par les étudiants-assistants. A la fin du semestre, un contrôle sous la forme d'un examen écrit est effectué. Cet examen comporte des petites questions de théorie ainsi que des problèmes similaires à ceux effectués lors des séances d'exercices. Une distribution possible pour définir la note est la suivante :

25% de la note rendus des exercices,

25% de la note pour les petites questions de théorie de l'examen,

50% de la note pour la résolution des problèmes de l'examen.

Le but de cette répartition, rappelons qu'il s'agit d'un cours de niveau bachelor, est d'encourager le travail régulier durant le semestre afin de bien acquérir la matière, et également de former des ingénieurs capables de rédiger des notes de calcul claires et correctes sous stress.

Littérature recommandée

BEAULIEU D., PICARD A., et al., **Calcul des charpentes en acier, tome 1**, ICCA, Institut canadien de la construction en acier, Willowdale, 2003.

DJALALY, H., **calcul de la résistance ultime au déversement**, Construction métallique, vol. 11, No. 1 et 4, 1974, pp. 58-77 et pp. 54-61.

DUBAS, P., **Stabilité des structures et des barres**, documentation D070, SIA, Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich, 1991.

ECCS, Technical Committee 8 – Structural stability, WG3 – plated structures, **Behavior and design of plated structures**, ECCS, publication no 44, Bruxelles, 1986.

ECCS Technical committee 8 – Stability, **Background documentation and design guidelines**, ECCS, publication no 119, Bruxelles, décembre 2006 (ISBN 92-9147-000-84).

GALAMBOS, T. V., **Structural Members and Frames**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1968.

HIRT, M.A., BEZ, R., et NUSSBAUMER, A. , **Construction Métallique: Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement**, Traité de Génie Civil 10, 2^{ème} édition revue et augmentée, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Mars 2006.

HIRT, M.A., CRISINEL, M., **Charpentes métalliques : Conception et dimensionnement des halles et bâtiments**, Traité de Génie Civil 11, 2^{ème} édition, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2005.

JOHNSON, B.G., **Guide to stability design criteria for metal structures**, John Wiley & Sons, New York, 2nd edition, 1976.

KLÖPPEL, K., SCHEER, J., **Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten**, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1960.

LTBEAM (2006), **Logiciel de calcul du moment critique de déversement élastique de poutres fléchies** (v1.07), CTICM, St-Aubain, France (téléchargeable sous <http://www.steelbizfrance.com/file/recfile.asp?idrub=58>).

EBPLATE, (2006), **Logiciel de calcul des contraintes critiques de voilement de plaque** (v1.18), CTICM, St-Aubain, France (téléchargeable sous <http://www.steelbizfrance.com/file/recfile.asp?idrub=58>).

STÜSSI, F., DUBAS, P., **Grundlagen des Stahlbaues**, Springer Verlag, 2^e édition, 1971.

TIMOSHENKO, S.P., **Théorie de la stabilité élastique**, Dunod, Paris, 1966 (2^{ème} édition).

Von KARMAN, T., SECHLER, E.E., DONNEL, L. H., **The strength of thin plates in compression**, Transactions of the ASME, vol. 54, 1932.

ANNEXE 1 : Halle utilisée pour les exercices

PRESENTATION DE LA HALLE INDUSTRIELLE

Chaque élément étudié ou dimensionné lors des séances d'exercices de l'année se rapportera à la halle industrielle présentée ci-dessous.

Introduction

La halle industrielle RAMELLA PRODUCTIONS PLASTIQUES SA a été construite en 2001, entre Morges et Lausanne près de Préverenges. Le projet a été effectué par le bureau d'ingénieurs: GEX et DORTHE de Bulle et a été réalisé par l'entreprise MORAND CONSTRUCTION METALLIQUES de Bulle.



Figure 1 – Photo de la halle pendant le montage

C'est une halle industrielle en construction métallique destinée à la production et à la vente de produits plastiques. Aucune exigence particulière n'a été prescrite pour le feu sauf un compartimentage (parois coupe-feu) et des sprinklers.

L'ensemble du complexe repose sur un radier précontraint de 20 cm d'épaisseur réalisé sans armature de fissuration et sans joint. Ce dernier repose sur 300 pieux jetting ayant une trame de 5m x 5m.

Structure métallique

La halle a une surface au sol de 110m x 45m et une hauteur variable comprise entre 5.25m et 9.75m. L'ensemble de la structure métallique a été réalisé en acier S 235 sauf les montants HEB en acier S 355.

La structure d'ensemble repose sur des portiques dont la trame est de 5m. Le cadre est constitué d'un sommier d'une portée de 15m lié rigidement aux montants (détail A).

La halle est stabilisée transversalement par un contreventement en croix de S¹-André.

La toiture repose sur des pannes portant sur deux ou trois travées de 5m avec un espacement de 2.5m.

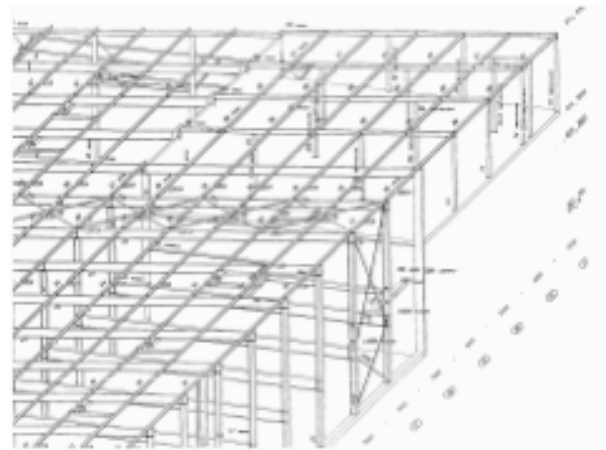


Figure 2 – Vue tridimensionnelle

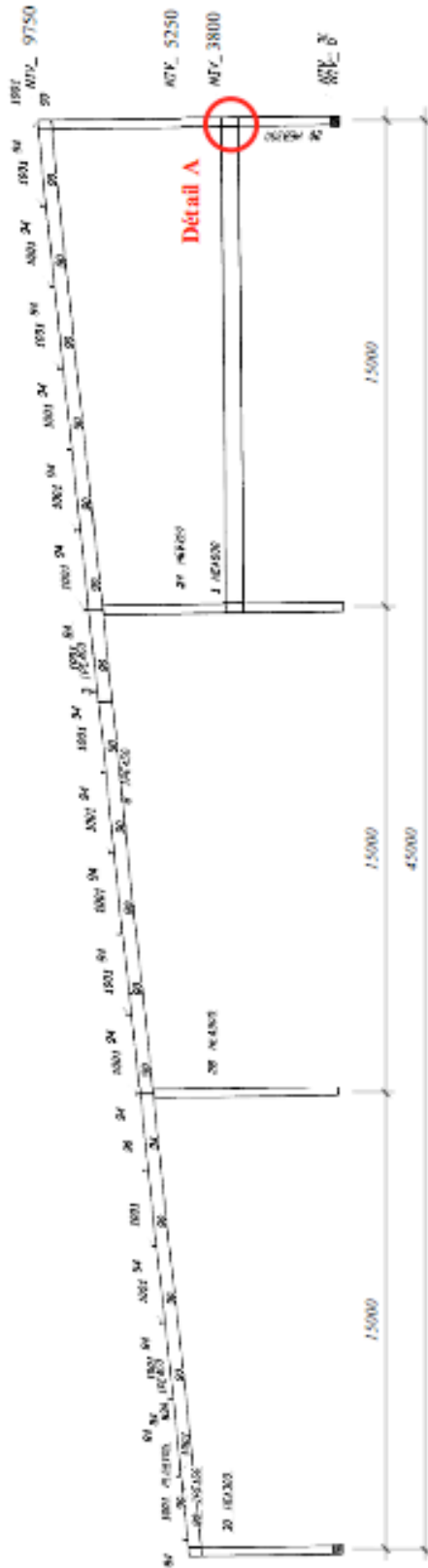


Figure 3 – Élévation des portiques



Figure 4 – Vue intérieure de la halle



Figure 5 – Détail A : assemblage

ANNEXE 2 : Exercice cadre non-tenu - DONNEE

But

Comprendre le comportement d'un cadre et savoir dimensionner des montants.

Références

Chapitres 11 et 12 du TGC vol. 11.

Donnée

La stabilité transversale de la halle est assurée par des cadres auto-stables (figures 1 et 2). Cela signifie qu'ils assurent leur stabilité dans le plan par leur propre rigidité (ici par l'assemblage rigide mis en évidence dans la figure 2, entre le sommier du plancher intermédiaire et les montants correspondants). Hors de leur plan, la stabilité est assurée par un contreventement, comme illustré dans la figure 1.



Figure 1 – Vue générale de la halle

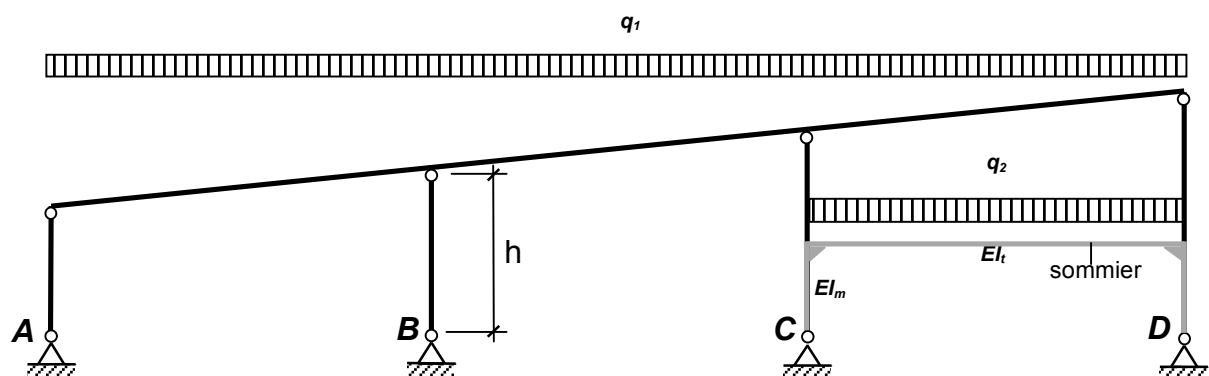


Figure 2 – Système statique et chargement des cadres

Un tel système est assez complexe pour une première étude de cadre, c'est pourquoi on se limitera à quelques réflexions sur ce cas. On analysera plus en détail le système de cadre plus simple présenté dans la figure 3. Celui-ci a des articulations aux pieds des montants et des angles rigides. Il est sollicité par une charge répartie q_d appliquée sur la traverse. Les dimensions, le type de profilés des éléments du cadre, le système statique ainsi que les charges de calcul sont présentés dans la figure 3. On admettra, par souci de simplification de l'exercice, que le déversement de la traverse est empêché. Pour la même raison, le flambage hors-plan est admis empêché.

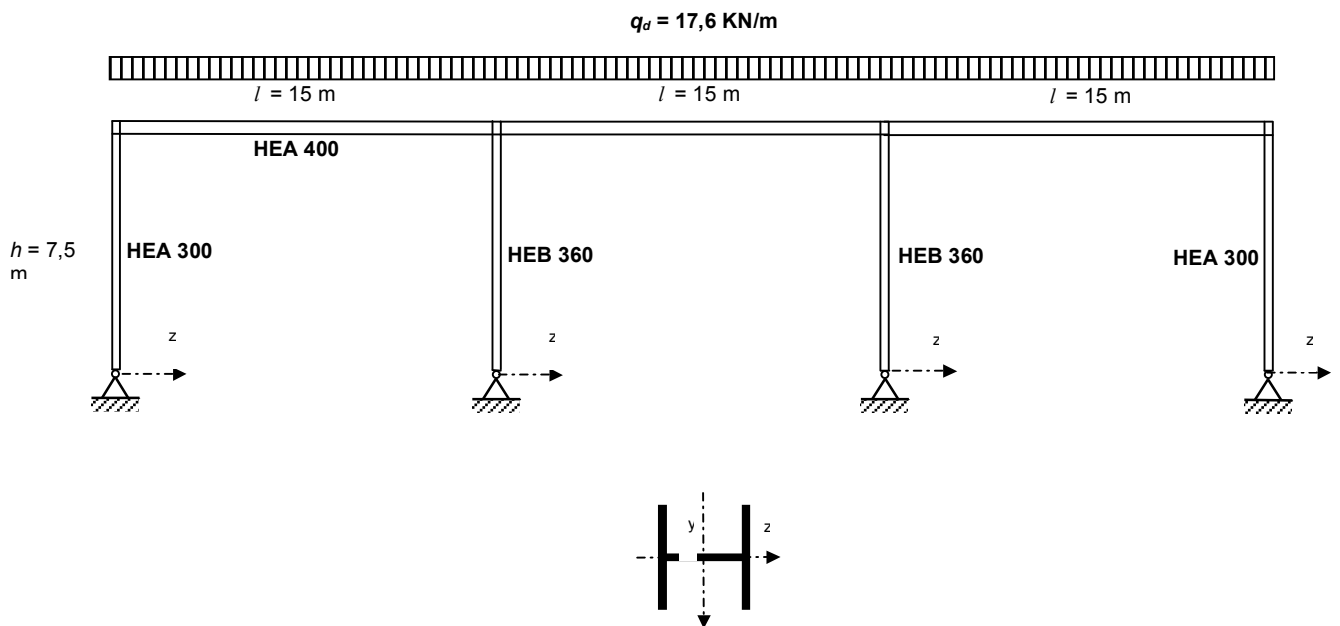


Figure 3 – Système statique, charges, dimensions du cadre et définition des axes du profilé

Questions

1. Cadre composé du plancher mixte et d'une partie des montants C et D (figure 2, partie grisée)
 - 1.1 a) Dessiner la déformée du cadre en considérant la traverse chargée.
 - b) Dessiner la forme de l'instabilité du cadre en faisant les hypothèses suivantes :
 - la rigidité de la traverse est considérablement supérieure à celle des montants,
 - la rigidité des montants est considérablement supérieure à celle de la traverse.
 - c) A partir de b), estimer les bornes pour la longueur de flambage des montants.
- 1.2 Dessiner pour le cadre la forme de l'instabilité réelle attendue.
2. Cadre entier de la halle (figure 2)
 - 2.1 a) Dessiner la déformée du cadre en considérant la toiture et la traverse intérieure chargées,
 - b) Dessiner la forme de l'instabilité du cadre en faisant les hypothèses suivantes :
 - la rigidité de la traverse est considérablement supérieure à celle des montants,
 - la rigidité des montants est considérablement supérieure à celle de la traverse.
 - c) A partir de b), estimer les bornes pour la longueur de flambage du montant de l'axe B.
- 2.2 Dessiner pour le cadre la forme de l'instabilité réelle attendue.

3. Cadre d'exercice (figure 3)

- 3.1 Déterminer à l'aide de l'abaque pour cadre (SZS C4.1 p. 22) les longueurs de flambage h_K pour chaque montant du cadre.
- 3.2 Déterminer la charge critique de flambage élastique N_{cr} de ces montants.
- 3.3
 - a) Déterminer s'il s'agit d'un cadre souple ou rigide et déterminer la méthode de calcul à appliquer pour le dimensionnement des éléments du cadre.
 - b) **Facultatif:** Vérifier à l'aide d'un programme EF si le cadre est souple ou rigide.
- 3.4 Effectuer la vérification de la sécurité structurale des montants de bord. Le moment à l'angle de cadre M_{Ed} vaut $q_d \cdot l^2 / 30$, l'effort normal N_{Ed} vaut $0,43 \cdot q_d \cdot l$ (valable pour cette situation particulière).

ANNEXE 3 : Exercice cadre non-tenu - CORRIGE

Question 1.1 a, b

Voir réponse à la question 2.1 a, b

Question 1.1 c

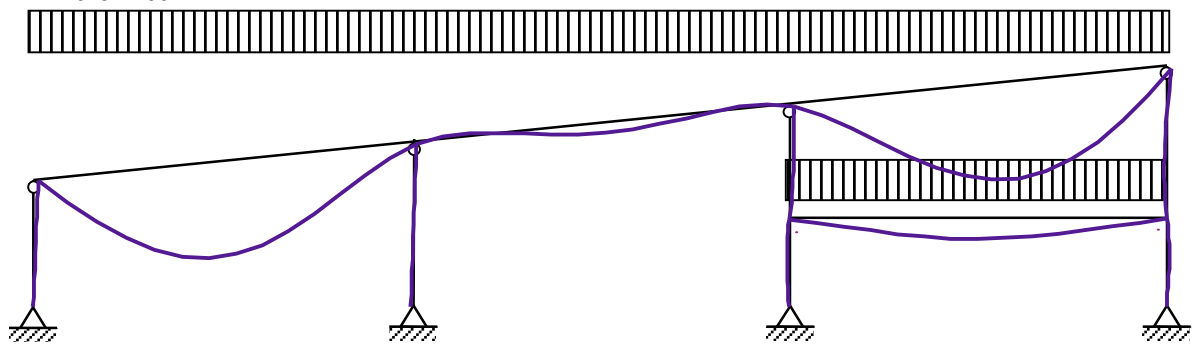
$2h < l_k < \infty$ (voir TGC 11, figure 11.26)

Question 1.2

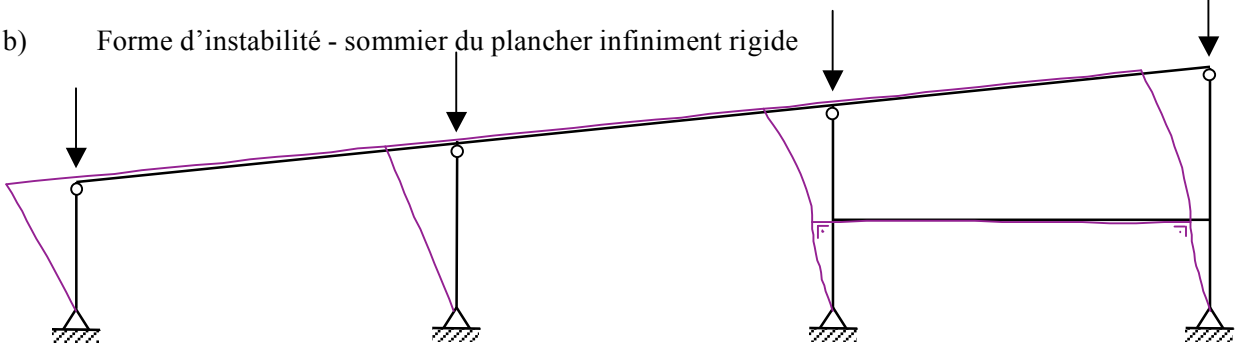
Voir réponse à la question 2.1 c

Question 2.1

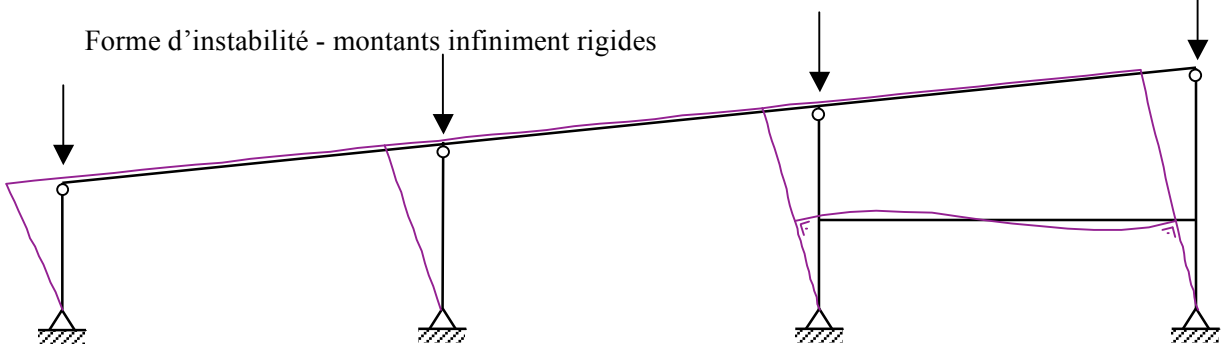
a) Déformée



b) Forme d'instabilité - sommier du plancher infiniment rigide



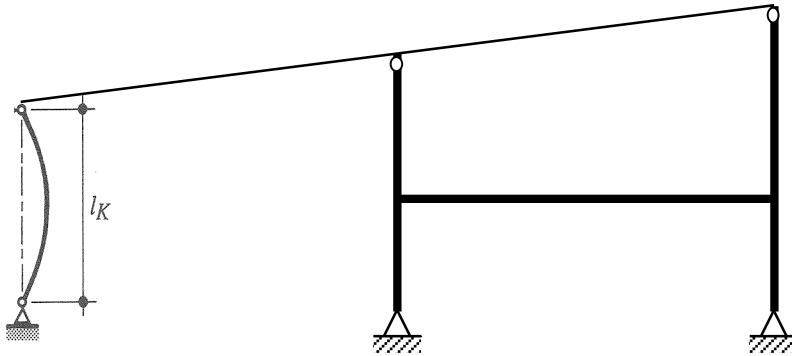
Forme d'instabilité - montants infiniment rigides



Question 2.1 c

Les bornes peuvent être déterminées de la manière suivante:

- Si le cadre CD est infiniment rigide, il agit comme un appui dans le sens horizontal pour le montant et la longueur de flambage est égale à h .



$$1.0 l$$

- Si le cadre CD est très souple, c'est comme si le montant était libre à son extrémité supérieure et la longueur de flambage est infinie.



$$\infty$$

Ainsi les bornes sont les suivantes: $h < l_k < \infty$

Question 2.2

Forme d'instabilité réelle



Question 3

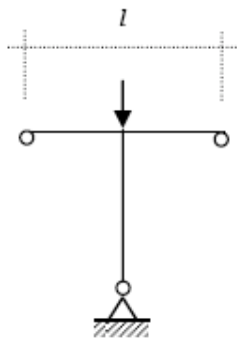
Remarque

Pour résoudre ce cas de manière **simplifiée**, nous proposons de diviser le cadre en 4 sous-systèmes. Cette manière de procéder est non conservatrice, car la somme des charges critiques des sous-systèmes est en réalité plus grande ou égale à la charge critique du système global. La **condition** pour avoir une égalité est que tous les montants atteignent leur point d'instabilité simultanément sous le cas de charge donné, donc que le rapport N_{Ed} / N_{cr} **soit constant** pour tous les montants.

Question 3.1

Les sous-systèmes choisis sont les suivants, en faisant l'hypothèse que leur point de division est au milieu des travées :

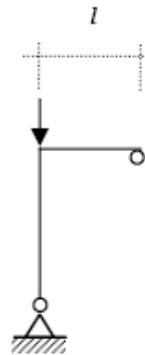
Pour les montants intérieurs



$$\eta = 1 / 4, \text{ courbe } F$$

$$l = 15 \text{ m}$$

Pour les montants extérieurs



$$\eta = 1, \text{ courbe } F$$

$$l = 7.5 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{intérieur}} = \eta \cdot \frac{I_{y,m} \cdot l}{I_{y,t} \cdot h} = \eta \cdot \frac{I_{y,HEB360} \cdot l}{I_{y,HEA400} \cdot h}$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \frac{431.9 \cdot 15}{450.7 \cdot 7.5} = 0.48$$

$$\rho_{\text{extérieur}} = \eta \cdot \frac{I_{y,m} \cdot l}{I_{y,t} \cdot h} = \eta \cdot \frac{I_{y,HEA300} \cdot l}{I_{y,HEA400} \cdot h}$$

$$= 1 \cdot \frac{182.6 \cdot 7.5}{450.7 \cdot 7.5} = 0.41$$

Selon l'abaque SZS C4.1 p.22, courbe F :

$$\beta = 2.3$$

$$h_{K,\text{intérieur}} = \beta \cdot h = 2.3 \cdot 7.5 = 17.3 \text{ m}$$

$$\beta = 2.25$$

$$h_{K,\text{extérieur}} = \beta \cdot h = 2.25 \cdot 7.5 = 16.9 \text{ m}$$

Question 3.2

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{k_K^2}$$

$$N_{cr,\text{intérieur}} = 3 \cdot 10^3 \text{ kN}$$

$$N_{cr,\text{extérieur}} = 1.33 \cdot 10^3 \text{ kN}$$

Vérification de la condition de simplification

Montants intérieurs : $N_{Ed}/N_{cr,\text{intérieur}} = 1.07 \cdot q_d \cdot l / (3 \cdot 10^3) = 0.094$

Montants extérieurs : $N_{Ed}/N_{cr,\text{extérieur}} = 0.43 \cdot q_d \cdot l / (1.33 \cdot 10^3) = 0.085$

} environ égal

→ On peut admettre que tous les montants deviennent instables simultanément.

Question 3.3

a) La condition de simplification étant respectée :

$$Q_{cr} \approx \Sigma N_{cr} = 2 \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ kN} + 2 \cdot 1.33 \cdot 10^3 \text{ kN} = 8.67 \cdot 10^3 \text{ kN}$$

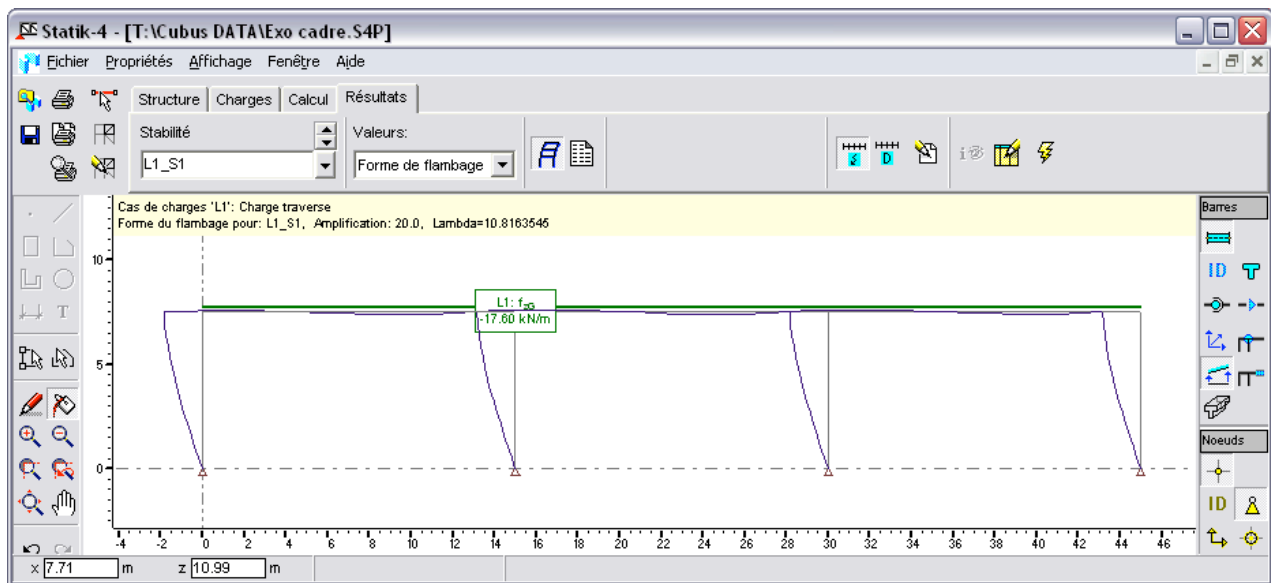
$$Q_d = \Sigma N_{Ed} = 3 \cdot 15 \text{ m} \cdot 17.6 \text{ kN/m} = 792 \text{ kN}$$

$$Q_{cr} / Q_d = 10.95 \geq 10$$

→ cadre rigide latéralement

→ calcul de 1^{er} ordre avec longueur de flambage correspondant au mode d'instabilité à nœuds déplaçables

b) D'un calcul par éléments finis, résulte un rapport $Q_{cr} / Q_d = 10.8$. L'approximation est donc acceptable.



Question 3.4

Efforts de calcul

$$M_{Ed} = q_d \cdot l^2 / 30 = 17.6 \cdot 15^2 / 30 = 132 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 0.43 \cdot q_d \cdot l = 0.43 \cdot 17.6 \cdot 15 = 114 \text{ kN}$$

Résistance au flambage

HEA 300 selon l'axe fort

$$N_{cr} = 1.33 \cdot 10^3 \text{ kN (question 2.2)}$$

$$\lambda_{Ky} = h_{Ky} / i_y = 16900 / 127 = 133 \text{ avec } i_y = 127 \text{ mm et } h_{Ky} = 16.9 \text{ m (question 2.1)}$$

$$\ddot{\epsilon}_E = \partial \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \partial \cdot \sqrt{\frac{210000 \text{ N/mm}^2}{235 \text{ N/mm}^2}} = 93.9$$

$$\bar{\ddot{\epsilon}}_{Ky} = \frac{\ddot{\epsilon}_{Ky}}{\ddot{\epsilon}_E} = \frac{133}{93.9} = 1.42 \text{ Courbe de flambage b, car profilé laminé selon axe fort.}$$

$$\chi_K = 0.37 \quad \text{calculé selon relations SIA 263 § 4.5.1.3} \\ \text{ou déterminé selon abaque SIA 263 figure 7 ou SZS C4.1}$$

$$\sigma_{Ky,Rd} = \chi_K \cdot f_y / \gamma_{M1} = 0.37 \cdot 235 / 1.05 = 82.8 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{Ky,Rd} = \sigma_{Ky,Rd} \cdot A = 82.8 \cdot 11300 = 936 \text{ kN}$$

Vérification de l'interaction N_{Ed} et M_{Ed}

$\omega = 1$, car le cadre n'est pas tenu transversalement (TGC 10, page 243).

$$M_{y,Rd} = \frac{f_y \cdot W_{pl,y}}{\tilde{\alpha}_{M1}} = \frac{235 \text{ N/mm}^2 \cdot 1380 \cdot 10^3 \text{ mm}^3}{1.05} = 308 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Ky,Rd}} + \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cry}}} \cdot \eta \cdot \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{114 \text{ kN}}{936 \text{ kN}} + \frac{1}{1 - \frac{114 \text{ kN}}{1330 \text{ kN}}} \cdot 1 \cdot \frac{132 \text{ kNm}}{308 \text{ kNm}} = \mathbf{0.59} \leq \mathbf{1.0} \rightarrow \mathbf{ok}$$

Notons que le calcul de résistance en section est déjà inclus dans la vérification puisque $\omega = 1$.