

Instabilité des barres de portiques en acier



D'après l'Eurocode 3

> Méthodes de calcul pour les barres
de portiques en acier (instabilités dans
le plan et hors du plan)

Guide Eurocode

D'après la norme NF EN1993-1-1: 2005
(Eurocode 3, partie 1-1)



INSTABILITÉ DES BARRES DE PORTIQUES EN ACIER

**Méthodes de calcul pour
les barres de portiques en acier
(instabilités dans le plan et hors plan)**

Directeur de collection : Ménad CHENAF (CSTB)

Auteur : Yvan GALÉA (CTICM)

Avertissement

Le présent guide ne se substitue en aucun cas aux textes de références qu'ils soient réglementaires, normatifs ou codificatifs.

Le CSTB décline toute responsabilité quant aux conséquences directes ou indirectes de toute nature qui pourraient résulter de toute interprétation erronée du contenu du présent guide.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 – art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

© CSTB mai 2012

ISBN 978-2-86891-424-8

AVANT-PROPOS

Les autorités publiques ont confié au CSTB l'organisation et la gestion d'un programme d'accompagnement de la mise en œuvre de la directive « produits de construction » (Directive 89/106 du 21 décembre 1988). Ce programme d'accompagnement, appelé « Plan Europe » comporte plusieurs volets, tous concourant à l'intégration des textes techniques européens du domaine de la construction dans les usages français.

Le Plan Europe a été dirigé et organisé par le CSTB, en partenariat avec les acteurs du bâtiment, partenariat formalisé par une convention en date du 1^{er} juin 2004. Les partenaires concernés sont :

- Le Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer ;
- Le Secrétariat d'État au Logement ;
- La Fédération Française du Bâtiment (FFB) ;
- La Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB) ;
- L'Union Sociale pour l'Habitat (USH) ;
- LA Fédération Française des Promoteurs Constructeurs de France (FPC France) ;
- la Confédération des Organismes indépendants tierce partie de Prévention, de Contrôle et d'Inspection (COPREC) ;
- L'Union Nationale des Syndicats Français d'Architectes (UNSFA) ;
- la Fédération professionnelle de l'ingénierie (SYNTEC-Ingénierie) ;
- La Chambre de l'Ingénierie et du Conseil de France (CICF) ;
- L'Association Française de Normalisation (AFNOR) ;
- Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

L'un des volets du Plan Europe est dédié spécifiquement aux Eurocodes. Il vise à procurer aux acteurs de la construction, pour les ouvrages courants, des outils leur permettant d'appliquer les principes et méthodes de dimensionnement proposées dans ces normes. Sont abordés à ce titre tous les matériaux habituels de structure : acier, béton, bois et maçonnerie vis-à-vis des actions normales, climatiques (vent, neige) ou accidentelles (feu, séisme).

Ce guide attire l'attention de l'utilisateur sur le domaine d'application couvert, forcément restreint par rapport à celui de l'Eurocode en question. Le choix délibéré a été de traiter les cas les plus couramment rencontrés. Cette restriction s'accompagnant d'une simplification de traitement.

Enfin, il est indispensable de souligner que les méthodes proposées dans ce guide sont destinées à réaliser des calculs de structure, et que leur utilisation suppose la connaissance des principes généraux de résistance des matériaux et de la mécanique des structures. Cette connaissance est indispensable pour effectuer les choix judicieux qui incombent au calculateur et apprécier la pertinence des résultats obtenus dans le contexte particulier de l'ouvrage qu'il dimensionne.

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	3
1.1	Objectif du guide.....	3
1.2	Domaine d'application	4
1.3	Comment utiliser ce guide.....	6
2.	CONFIGURATIONS TRAITÉES	9
2.1	Généralités sur les maintiens	9
2.2	Découpage du portique en barres.....	10
2.3	Configurations traitées dans ce guide	12
2.4	Identification des configurations dans les portiques	14
2.5	Hypothèses communes à toutes les configurations traitées.....	18
3.	TRAITEMENT DES CONFIGURATIONS	19
3.1	Configuration Type 1	19
3.2	Configuration Type 2	25
3.3	Configuration Type 3	33
3.4	Configuration Type 4	37
3.5	Configuration Type 5	44
3.6	Configuration Type 6	48
4.	EXEMPLES D'APPLICATION	57
4.1	Exemple 1	57
4.2	Exemple 2	62
4.3	Exemple 3	69
4.4	Exemple 4	77
4.5	Exemple 5	84
5.	RÉFÉRENCES	91
	ANNEXES	93
ANNEXE FFPP	Flambement de poteaux par flexion dans le plan du portique. Effort normal critique de flambement par flexion.....	95
ANNEXE FFTP	Flambement de traverses par flexion dans le plan du portique. Effort normal critique de flambement par flexion.....	99
ANNEXE FPPIV	Flambement de poteaux de portiques à inertie variable. Effort normal critique de flambement par flexion dans le plan ..	103
ANNEXE FTPIC	Flambement de la traverse de portiques simples dans leur plan. Poteaux et traverse à inerties constantes. Portiques symétriques et symétriquement chargés.....	109
ANNEXE NCRZ	Barre uniforme comprimée. Effort normal critique de flambement par flexion hors plan.....	111
ANNEXE NCRT	Barre uniforme comprimée. Effort normal critique de flambement par torsion	113

ANNEXE NCRZTM	Barre uniforme comprimée, avec maintiens latéraux excentrés. Effort normal critique de flambement hors plan.....	115
ANNEXE NCRZTMV	Barre en fuseau partiel ou total comprimée, avec maintiens latéraux excentrés. Effort normal critique de flambement hors plan.....	119
ANNEXE MCRU	Barre uniforme, sous moment constant. Moment critique de déversement.....	123
ANNEXE MCRL	Barre uniforme, sous moment linéaire. Moment critique de déversement.....	125
ANNEXE MCRNL	Barre uniforme, sous moment non linéaire. Moment critique de déversement.....	127
ANNEXE MCRLV	Barre en fuseau, sous moment linéaire. Moment critique de déversement.....	135
ANNEXE MCRNLV	Barre en fuseau partiel ou total, sous moment linéaire ou modérément non linéaire. Moment critique de déversement.....	137
ANNEXE MCRMU	Barre uniforme, sous moment constant, avec maintiens latéraux côté semelle tendue. Moment critique de déversement.....	141
ANNEXE MCRML	Barre uniforme, sous moment linéaire, avec maintien latéral côté semelle tendue. Moment critique de déversement.....	145
ANNEXE MCRMLV	Barre en fuseau, sous moment linéaire, avec maintien latéral côté semelle tendue. Moment critique de déversement.....	149
ANNEXE FHMPN	Flambement hors plan sous flexion et compression. Courbe d'interaction de Dunkerly.....	151
ANNEXE MGFHP	Flambement hors plan – Méthode générale de l'élançement réduit global (EN-§6.3.4).....	153
ANNEXE LTBEAM	Calcul du moment critique de déversement à l'aide du logiciel LTBeam	159
ANNEXE VOILAM	Vérification du voilement.....	161

1. INTRODUCTION

1.1 Objectif du guide

Les portiques de bâtiments industriels comportent très souvent des barres à inertie variable (dites « non uniformes »), fléchies et/ou comprimées, dont la vérification de la résistance au flambement et/ou déversement ne rentre pas dans le cadre de l'application des formules établies dans l'EN1993-1-1 [1] pour les barres à section constante (dites « uniformes »). De plus, certaines conditions usuelles de maintien latéral des barres (ex. maintien d'une seule semelle), que ces dernières soient uniformes ou non, excluent également, dans de très nombreux cas, l'application de ces formules. L'EN1993-1-1 propose bien d'appliquer une méthode générale (paragraphe 6.3.4) pour vérifier la stabilité hors plan, mais l'énoncé de cette nouvelle méthode mérite d'être clarifié dans ce contexte. La conclusion générale est que l'EN1993-1-1, à l'instar des divers règlements qui l'ont précédé, laisse souvent le praticien désorienté, voire désarmé, pour traiter le portique de bâtiment industriel courant.



Photo APK – Y. Delos



Photo APK – JP. Muzeau

L'objectif de ce guide est donc de fournir au praticien les compléments nécessaires au traitement par l'EN1993-1-1 [1] de cas courants rencontrés dans la pratique en matière de vérification des poteaux et traverses de portiques en acier aux instabilités, notamment en ce qui concerne l'instabilité hors plan. Des méthodologies complètes de vérification de la résistance de barres de portiques sont ainsi proposées.

Les configurations visées dans ce guide sont clairement définies de manière à permettre à l'utilisateur de les identifier dans les portiques étudiés. La méthodologie de vérification de la résistance d'une barre est présentée pour chaque configuration avec, le cas échéant, des aides au calcul reportées en annexes.

Il est précisé ici que la méthodologie présentée pour une configuration donnée est celle qui a été jugée la plus fidèle à l'esprit de l'**EN1993-1-1**, sans pour cela adopter d'approches simplistes ou de simplifications excessives souvent non économiques. Cela peut donc permettre de considérer les méthodes ainsi proposées comme des méthodes de référence qui pourront le cas échéant servir de base à l'élaboration future de méthodes simplifiées.

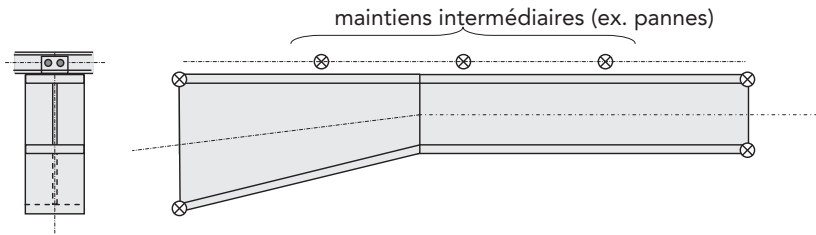
De manière à ne pas reproduire ce qui est déjà présent dans l'**EN1993-1-1** et alourdir le guide, la description d'une méthodologie fait au maximum référence aux paragraphes concernés de la norme en précisant les principaux paramètres d'entrée, et fournit les informations nécessaires pour ce qui n'est pas traité dans la norme.

Des exemples d'application sont développés, en remplaçant les barres vérifiées dans leur contexte structural.

Enfin, ce guide aborde essentiellement les aspects touchant à la résistance des barres aux instabilités de type flambement (flexion, torsion, torsion-flexion) ou déversement. Des indications sur les vérifications de voilement sont données dans une annexe. Les procédures décrites doivent donc être complétées pour tout ce qui concerne les autres aspects (voilement des âmes cisailées, vérification des soudures, fatigue, flèches, etc.).

1.2 **Domaine d'application**

D'une manière générale, le guide s'applique aux portiques plans en acier de bâtiments industriels courants ou assimilés, donc généralement à un niveau, pouvant être analysés dans leur plan et constitués de barres en profils en I doublement symétriques. Les barres, essentiellement les poteaux et traverses, supposées orientées avec leur plan de forte inertie dans le plan du portique, sont soit à section constante, soit à hauteur d'âme linéairement variable sur tout ou partie de leur longueur, avec semelles constantes. Les barres à sections étagées (ex. poteaux baïonnettes) ne sont pas visées dans ce guide.



Exemple de barre traitée dans ce guide

Le Tableau 1 présente des schémas des configurations traitées dans ce guide.

Dans les configurations étudiées, les barres traitées sont supposées délimitées par des sections bloquées à la fois en rotation autour de leur axe longitudinal (rotation de torsion) et translation hors plan du portique. Ces barres peuvent posséder un ou plusieurs maintiens ponctuels intermédiaires en translation hors plan le long d'une seule semelle, voire un tel maintien continu. Les maintiens ponctuels sont supposés alignés et à peu près régulièrement espacés le long de la barre. La ligne de maintien est supposée parallèle à la semelle supérieure de la barre. Tout maintien selon un déplacement (translation ou rotation de torsion) est considéré rigide.

Les maintiens ponctuels intermédiaires (ou le maintien continu) peuvent apporter en plus de leur blocage en déplacement latéral une certaine rigidité s'opposant à la rotation de torsion de la barre, mais cette rigidité n'est pas considérée dans les formules de détermination de paramètres de stabilité élastique (efforts normaux ou moments critiques) données dans les annexes de ce guide. L'effet d'une telle rigidité peut être pris en compte par ailleurs en utilisant des logiciels spécifiques ou des formulations adaptées.

Les barres étudiées sont de nuance d'acier homogène et sont soumises soit à une compression, soit à une flexion dans leur plan de forte inertie, soit à une combinaison de ces deux sollicitations. La flexion biaxiale n'est donc pas abordée dans ce guide. La compression est supposée constante le long de la barre. Concernant le déversement, l'éventuel effet de charges transversales appliquées le long de la barre en dehors du centre de gravité des sections peut en général être pris en compte dans le cadre des méthodologies exposées.

Les effets du voilement sous contraintes normales (dues à la compression et/ou la flexion) sont pris en compte au niveau de la détermination de la classe des sections.

1.3 Comment utiliser ce guide

1.3.1 Documents nécessaires

L'utilisation de ce guide requiert avant tout l'EN1993-1-1 [①] auquel il fait régulièrement référence, accompagné de son Annexe Nationale [②]. Le praticien doit donc pouvoir consulter ce guide et ces documents en parallèle. Les formules ou méthodes de vérifications jugées assez clairement définies dans la norme ne sont, sauf cas particulier, pas reprises ici.

1.3.2 Organisation du contenu

Le contenu du guide a été organisé comme suit :

■ Chapitre 2 : Configurations traitées

Il s'agit d'une présentation des configurations traitées, notamment dans 2.3 où le praticien trouvera un Tableau résumé, avec une aide en 2.4 à la reconnaissance de configurations dans des portiques. La connaissance de la terminologie définie en 2.2 est nécessaire à la bonne interprétation des méthodologies exposées.

■ Chapitre 3 : Traitement des configurations

Chaque configuration est traitée pour 3 types de chargement (compression seule, flexion seule, compression + flexion). Pour chaque configuration traitée, le praticien trouvera donc en général la présentation suivante :

- **Hypothèses**
- **Compression seule**
 - Information sur la méthodologie adoptée
 - Paragraphe(s) directement concerné(s) de l'EN1993-1-1
 - Étapes principales de la procédure de vérification
 - Paramètres de stabilité élastique nécessaires aux calculs
- **Flexion seule**
 - Information sur la méthodologie adoptée
 - Paragraphe(s) directement concerné(s) de l'EN1993-1-1
 - Étapes principales de la procédure de vérification
 - Paramètres de stabilité élastique nécessaires aux calculs
- **Compression et flexion**
 - Information sur la méthodologie adoptée
 - Paragraphe(s) directement concerné(s) de l'EN1993-1-1
 - Étapes principales de la procédure de vérification
 - Paramètres de stabilité élastique nécessaires aux calculs
- **Voilement**

Note

Les paramètres de stabilité élastique sont essentiellement les efforts normaux critiques de flambement élastique ($N_{cr,y}$, $N_{cr,z}$, $N_{cr,T}$, $N_{cr,zT}$, etc.), les moments critiques de déversement élastique (M_{cr}), les facteurs de charge critiques d'instabilité dans le plan ou hors plan (α_{cr} , $\alpha_{cr,op}$, etc.) utilisés au cours des étapes des procédures de vérification présentées (calcul d'élançements réduits, etc.).

■ Chapitre 4 : Exemples d'application

Cinq exemples sont fournis pour concrétiser l'application des procédures définies. Les barres traitées sont replacées dans leur contexte structural (portique). Ces cinq exemples traitent de barres soumises à une combinaison compression + flexion de manière à englober les calculs correspondant aux cas de sollicitations simples compression seule ou flexion seule.

■ Annexes

De nombreuses annexes sont fournies comme aide au calcul de paramètres particuliers de stabilité élastique (ex. efforts normaux ou moments critiques) pour certaines configurations. Ces annexes constituent donc une « boîte à outils » à laquelle les procédures présentées pour chaque configuration font référence. Ces annexes ne couvrent malheureusement pas tous les besoins dans la mesure où des formulations fiables font actuellement défaut pour certains cas. Le recours à des logiciels spécifiques de calcul de chargement critique peut donc s'avérer nécessaire pour ces cas en attendant la disponibilité de formulations adaptées.

1.3.3 Conduite de l'utilisation du guide

L'utilisation de ce guide peut donc être conduite comme suit :

- reconnaissance de la configuration dans le tableau des configurations traitées du paragraphe 2.3 (en s'aidant le cas échéant des exemples d'identification du paragraphe 2.4) ;
- report à la configuration concernée du Chapitre 3 ;
- vérification des hypothèses de la configuration ;
- application de la méthodologie décrite, en fonction des sollicitations (compression, flexion, compression + flexion), avec report aux Annexes lorsque mentionné. L'application de la méthodologie implique l'utilisation directe de l'**EN1993-1-1** et de son Annexe Nationale ;
- contrôle éventuel de la bonne interprétation de la méthodologie proposée en se reportant aux exemples traités au Chapitre 4.

1.3.4 Notations – Convention pour les références à l'EN1993-1-1

Dans toute la mesure du possible, les notations utilisées dans ce guide sont celles de l'EN1993-1-1.

Pour éviter la confusion avec les références aux paragraphes de ce guide, les références à l'EN1993-1-1 sont notées « *EN-§xxx* », « *EN-Tableau xxx* » ou « *EN-Annexe xxx* ».

2. CONFIGURATIONS TRAITÉES

2.1 Généralités sur les maintiens

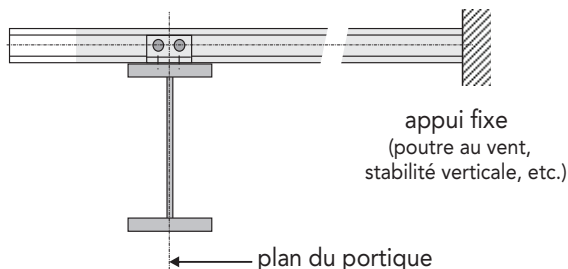
Les poteaux et traverses de portiques possèdent généralement sur leur longueur des maintiens latéraux hors plan du portique. Ces maintiens peuvent être ponctuels (lisses, pannes) ou continus (bacs, plateaux, maçonnerie, etc.).

Les maintiens ponctuels peuvent n'assurer qu'un maintien en translation hors plan du portique à une certaine distance du centre de cisaillement de la section maintenue (par exemple au niveau d'une des semelles), ou assurer en plus le maintien en rotation longitudinale (rotation de torsion) de la section – par exemple par l'utilisation de bracons.

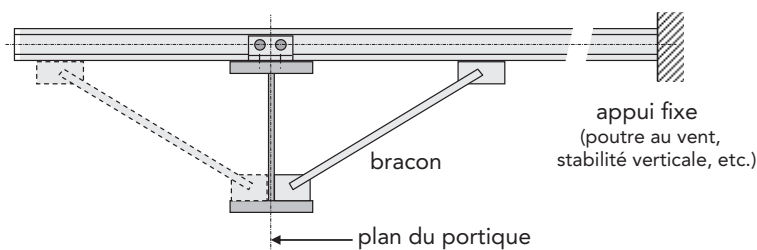
Les maintiens continus assurent généralement un maintien en translation hors plan du portique à une certaine distance du centre de cisaillement de la section maintenue (ex. maintien par fixation sous bac).

Lorsqu'il ne concerne qu'une semelle (maintien intermédiaire), toute rigidité qu'un maintien pourrait opposer à la rotation longitudinale de la section maintenue est négligée dans les calculs de sollicitations critiques (efforts normaux ou moments) exposés dans les annexes de ce guide. C'est le cas par exemple de la rigidité de flexion de pannes continues fixées sur des traverses.

On considérera ici que tout maintien pris en compte, que ce soit en translation ou translation/torsion, est rigide et bloque le(s) déplacement(s) concerné(s). Cela suppose donc une conception et un dimensionnement appropriés en rigidité et résistance des éléments qui assurent les maintiens (bracons, pannes, stabilités verticales, poutres au vent, etc.).



Blocage typique de la section en déplacement latéral au niveau de la semelle supérieure (la rigidité de maintien en rotation longitudinale est négligée)



*Blocage typique de la section en déplacement latéral et rotation longitudinale (torsion)
(la panne est supposée avoir la rigidité adéquate)*

Concernant la rigidité minimale des maintiens pour assurer un blocage effectif du déplacement, le praticien pourra se reporter par exemple

- au Commentaire du paragraphe 5,23 2) de l'Additif 80 aux Règles CM66 [6] pour la rigidité minimale que doit opposer une panne (ou une lisse) au déplacement latéral de la semelle d'une traverse (ou d'un poteau) de portique pour qu'elle constitue un point de maintien latéral rigide ;
- au §EN-BB.2.1 de l'EN-Annexe BB pour la rigidité minimale que doit opposer une tôle à profil trapézoïdal au déplacement latéral de la semelle d'une traverse (ou d'un poteau) de portique pour qu'elle constitue une ligne de maintien latéral rigide dans le plan de la tôle.

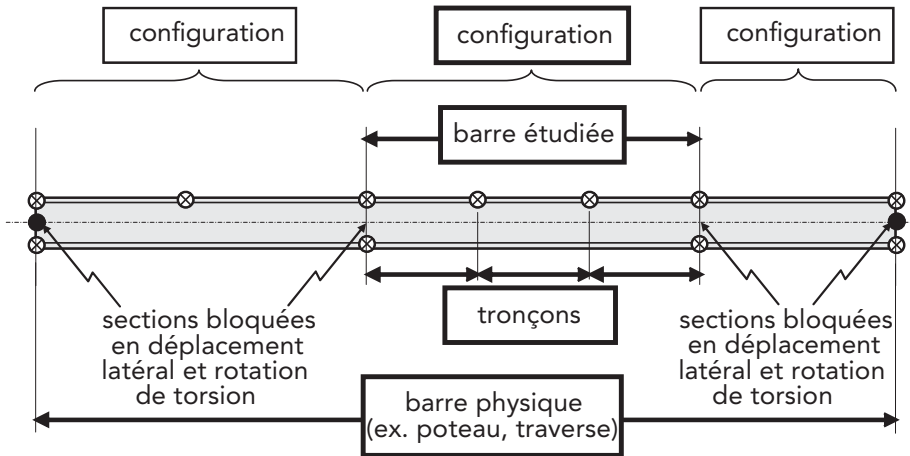
Dans le cas de maintiens ne pouvant être considérés comme rigides (appuis élastiques), une étude plus précise serait nécessaire, avec des outils appropriés (logiciels, etc.).

2.2 Découpage du portique en barres

Les portiques sont constitués de « *barres physiques* » qui sont délimitées par les « nœuds d'intersection » ou « points d'épure » (ex. point d'épure au faîtage ou au jarret, pied de poteau, etc.). Ces barres physiques comportent souvent plusieurs sections bloquées à la fois en rotation de torsion et translation hors plan par des éléments agissant perpendiculairement au plan du portique (ex. pannes, bracons, etc.) et auxquels les barres physiques sont attachées.

Les « *barres étudiées* » considérées ici, et qui définissent les « *configurations* » en fonction de leurs conditions de maintien et de sollicitation entre extrémités, sont précisément délimitées par ces sections bloquées à la fois en translation hors plan et rotation de torsion. Ces barres peuvent elles-mêmes posséder entre ces sections bloquées un ou plusieurs maintiens ponctuels intermédiaires en translation hors plan, au niveau d'une semelle, définissant ainsi des « *tronçons* ».

En cas de maintien continu, la notion de tronçons disparaît.



⊗ : maintien rigide en déplacement latéral

Découpage d'une barre physique – Terminologie

Dans les annexes de ce guide qui traitent de l'instabilité hors plan (flambement latéral par flexion, flambement par torsion ou flexion-torsion, déversement), il est généralement supposé qu'il n'y a pas d'interaction entre les configurations : les barres étudiées sont considérées isolées eu égard à cet aspect, ou bordées par des barres qui sont instables pour un niveau similaire de chargement et n'apportent donc aucun effet stabilisant ou déstabilisant.

Pependant, si une interaction était à envisager, notamment en cas d'effet déstabilisant attendu, il y aurait lieu d'en tenir compte dans la détermination des charges critiques concernées (efforts normaux critiques de flambement ou moments critiques de déversement), en traitant la barre étudiée avec son environnement immédiat (ex. barres adjacentes avec leur propre chargement).

Dans une majorité de cas, cette détermination nécessite l'utilisation de logiciels spécifiques (ex. *LTBeam* pour le déversement – voir *Annexe LTBEAM* à ce guide).