

Amélioration de la précision des formules d'interaction de l'Eurocode 3 pour les structures d'échafaudage sensibles aux effets du second ordre

C. Mercier

Université de Lorraine, IJL, UMR CNRS 7198, Nancy, France

charlotte.mercier@univ-lorraine.fr

RÉSUMÉ. La vérification des barres comprimées fléchies suivant l'Eurocode 3 Partie 1-1 est réalisée au moyen de formules d'interaction permettant de tenir compte des imperfections initiales d'une structure tout en s'affranchissant de leur modélisation. Cependant, à travers l'application de ces formules, il est possible de mettre en évidence que les résultats obtenus sont surestimés par rapport à une vérification en section lorsque l'on intègre les imperfections initiales au modèle de calcul. Cette différence est expliquée par le coefficient de réduction au flambement χ , qui permet de prendre en compte les imperfections initiales ; mais qui est défini et déterminé pour une structure sollicitée à son effort maximal. Pour pallier ce problème, nous avons défini des nouvelles formules d'interaction faisant intervenir de nouveaux coefficients de flambement χ^* et qui permettent de prendre en compte : le niveau réel de sollicitation de la structure, le type de comportement (élastique, plastique linéaire ou plastique non-linéaire) en lien avec la classe de la section transversale. Une procédure de calcul pour le dimensionnement des barres comprimées fléchies sans déversement est également proposée.

ABSTRACT. Eurocode 3 Part 1-1, European design code for steel structures, through to the buckling resistance criterion, makes it possible to take into account the initial imperfections in the criterion without including them in the model structure. However, through several examples, we can highlight that the buckling resistance verification overestimates the results compared to the cross-section resistance verification when the initial imperfections are included in the model structure. This difference comes from the buckling reduction factor χ , which is defined to a structure loaded at its full potential. To overcome this problem, new interaction formulae are defined in taking into account the type of resistance criterion used (elastic, linear plastic and non-linear plastic) in line with the class of the cross-section. These new interaction formulae are based on the definition of new buckling coefficients χ^* dependent directly on the charge level of the structure. A flow chart of the design procedure for beam-columns without lateral-torsional buckling is proposed.

MOTS-CLÉS : formules d'interaction, échafaudage, effets du second ordre, barres comprimées fléchies, poteau/poutre.

KEY WORDS : sensitive structure, second order effect, interaction formulae, beam-columns.

1. Introduction

Le dimensionnement des échafaudages doit être réalisé à partir de modèles et d'hypothèses qui reflètent au mieux leurs comportements. Les sollicitations peuvent être déterminées à partir d'une analyse au 1^{er} ou au 2nd ordre selon l'influence de la déformation de la structure. En général, on peut noter que pour les structures d'échafaudage, du fait de leur faible rigidité (vis-à-vis de la rigidité des bâtiments), les imperfections structurelles génèrent des effets du second ordre importants qui doivent donc être pris en compte dans le dimensionnement. La difficulté subsiste sur la façon la plus appropriée de définir et de prendre en compte ces imperfections initiales de la structure.

Les montants d'échafaudage sont des éléments soumis à de la compression et de la flexion combinées. Le dimensionnement de telles structures peut être effectué de deux manières :

- dimensionnement en section où les imperfections initiales sont incluses dans le modèle ;
- dimensionnement en instabilité où les imperfections initiales ne sont pas incluses dans le modèle.

Cette deuxième méthode est celle proposée par la norme Européenne pour le dimensionnement des structures en acier (Eurocode 3) [NF EN 1993-1-1]. Plusieurs études [TC8 06], [MAQ 01] ont été menées afin de mettre en évidence les fondements théoriques de ces formules d'interaction. Cependant, à travers plusieurs exemples, il est possible de mettre en évidence que les résultats obtenus avec cette méthode sont surestimés par rapport aux

résultats obtenus à partir d'une vérification en section, lorsque les imperfections initiales sont incluses dans le modèle. De plus, l'écriture actuelle de ces formules d'interaction ne permet pas d'apprécier correctement l'effet de chaque composante de la sollicitation totale. Boissonnade et al. [BOI 02] proposent une amélioration de la précision de ces formules d'interaction ; cependant, cette amélioration ne permet pas l'utilisation de différents niveaux de critère (élastique, plastique linéaire ou plastique non-linéaire) suivant la classe de la section transversale. Ainsi, le but de cet article est de proposer des formules d'interaction plus précises, plus transparentes et qui permettent d'avoir plusieurs niveaux de critère.

2. Principe actuel de dimensionnement des barres comprimées fléchies

2.1. Définition des critères actuels

Le dimensionnement d'une barre comprimée fléchie peut être effectué à partir de deux critères :

- Critère de résistance en section en incluant les imperfections initiales dans le modèle :
Pour un critère élastique ou plastique linéaire :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}^{II}}{M_{Rd}} \leq 1 \quad [1]$$

où M_{Rd} peut être égal à $M_{el,Rd}$ lorsque l'on choisit un critère de résistance élastique, ou à $M_{pl,Rd}$ lorsque l'on choisit un critère de résistance plastique linéaire.

Pour un critère plastique non-linéaire :

$$\frac{M_{Ed}^{II}}{M_{N,Rd}} \leq 1 \quad [2]$$

Cette méthode nécessite la modélisation des imperfections initiales. La question réside dans la manière de les définir. Il existe deux méthodes : la méthode conventionnelle, avec une imperfection globale et une imperfection locale ; et la méthode alternative basée sur la définition d'une imperfection unique d'allure identique à la déformée critique du mode de flambement de la structure. Dans notre cas, nous avons fait le choix d'utiliser la méthode alternative proposée par l'Eurocode 3 (§5.3.2(11)). En effet, cette méthode permet de prendre en compte les aspects géométriques, les conditions aux limites, les propriétés mécaniques intrinsèques et le niveau de chargement de la structure dans la définition de l'imperfection ; ce qui n'est pas possible avec les méthodes conventionnelles de l'Eurocode 3 (§5.3.2(3) et §5.3.2(7)). Cette méthode est donc plus précise et plus représentative de la réalité [CHL 13].

- Critère de résistance en instabilité sans inclure les imperfections initiales dans le modèle :

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \times \frac{M_{Ed}^I}{M_{Rd}} \leq 1 \quad [3]$$

Le coefficient k_{yy} peut être déterminé suivant deux méthodes : l'Annexe A ou l'Annexe B.

Pour ce qui est de cette seconde méthode, l'écriture actuelle ne permet pas d'apprécier de manière précise et transparente l'effet de chaque composante. En effet, le terme k_{yy} tient compte de l'effort de compression et ainsi ne correspond pas à la part du moment flexion. De plus, il est important de noter que ce critère en instabilité ne permet qu'un critère élastique ou plastique linéaire. Dans le cas, où l'on souhaite utiliser la capacité plastique non-linéaire de la section, il faut nécessairement passer par la définition et la modélisation des imperfections initiales dans le modèle de calcul.

Nous avons également cherché d'observer la précision de la seconde méthode en la comparant à la première méthode, qui est la méthode correcte de référence mais contraignante car elle nécessite la définition et la modélisation des imperfections initiales. Nous avons donc appliqué les deux méthodes à différentes structures afin de pouvoir les comparer.

fléchies

2.2. Application des critères actuels

La comparaison des deux méthodes actuelles a été réalisée sur plusieurs structures, dont des barres isolées, des portiques et des structures type d'échafaudage. Les résultats présentés ici sont ceux obtenus pour une tour autostable (Figure 1a) et un échafaudage de façade (Figure 1b). Ces structures, du fait de leur faible rigidité, sont très sensibles aux effets du second ordre.

Elles sont constituées de section tubulaire 48,3x2,9mm en acier S320. La rigidité prise en compte à la liaison moise/poteau est de 50kN.m/rad.

La tour autostable est modélisée avec des vérins en pieds, dont la rigidité est prise égale à 20kN.m/rad, comme préconisé dans la norme pour les structures temporaires [NF EN 12811-1]. Elle est sollicitée avec une charge verticale et une charge horizontale en tête de chaque montant.

L'échafaudage de façade quant à lui est modélisé avec des appuis articulés et est sollicité avec une charge verticale en tête de chaque montant ainsi qu'une charge répartie sur le montant opposé aux appuis de façade.

Dans les deux cas, l'intensité des charges varie de sorte que le coefficient α_{cr} de chaque structure varie de 1,5 à 20.

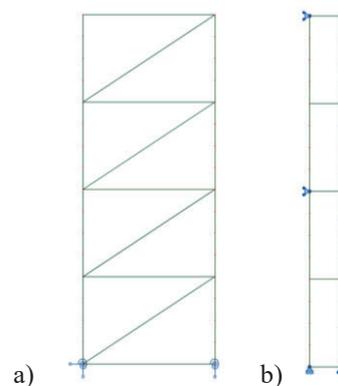


Figure 1. a) Tour autostable 8x3m : b) Echafaudage de façade 8x0,7m.

Les figures 2 et 3 présentent les résultats obtenus à partir des deux critères, en section ou en instabilité en utilisant les respectivement les résistances élastiques et les résistances plastiques des sections.

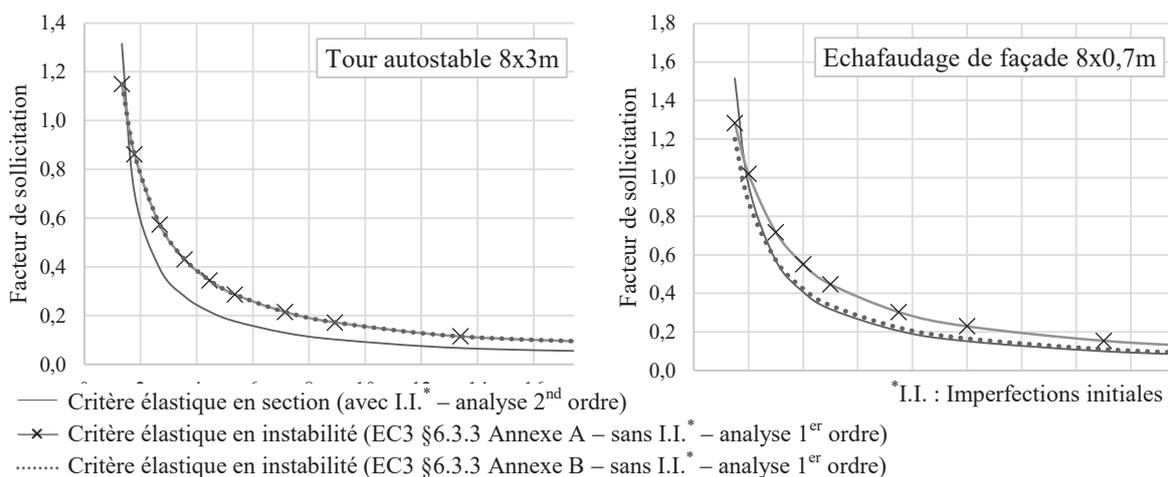


Figure 2. Résultats critères élastiques actuels pour la tour autostable et l'échafaudage de façade.

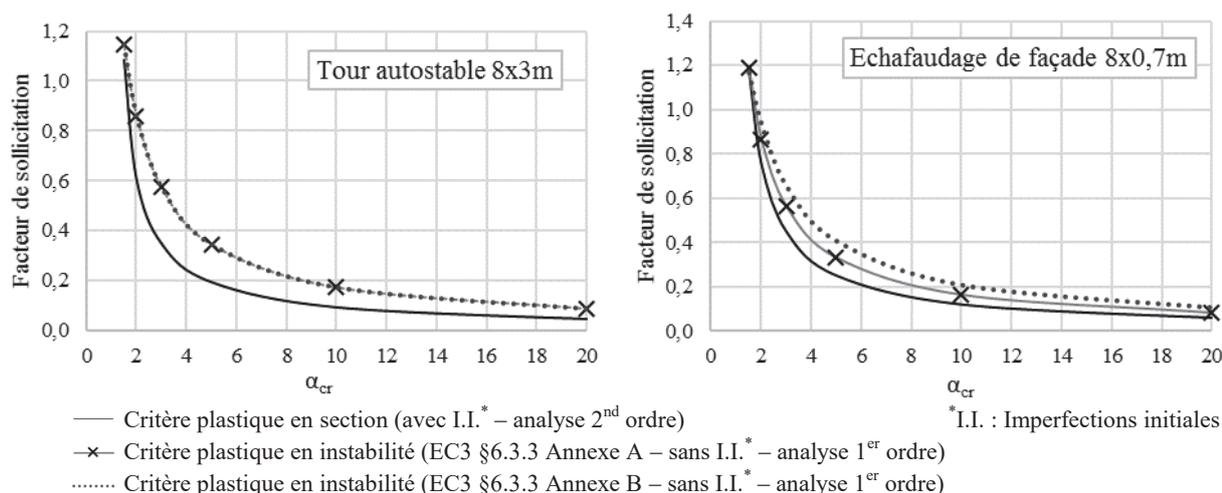


Figure 3. Résultats critères plastiques actuels pour la tour autostable et l'échafaudage de façade.

D'après les résultats précédents, on peut voir que les formules d'interaction de l'Eurocode 3 (§6.3.3) surestiment les résultats par rapport à une vérification en section lorsque les imperfections initiales sont générées dans le modèle de la structure. Les erreurs commises avec les méthodes de l'Eurocode 3 par rapport à la méthode en section sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Erreurs maximales et moyennes commises avec les critères en instabilité (Annexe A et Annexe B).

		Critère élastique		Critère plastique	
		Annexe A	Annexe B	Annexe A	Annexe B
Tour autostable	Erreur maximale	+70%	+70%	+89%	+88%
	Erreur moyenne	+50%	+50%	+60%	+60%
Echafaudage de façade	Erreur maximale	+57%	-21%	+77%	+38%
	Erreur moyenne	+34%	+2%	+47%	+25%

On peut ainsi constater que l'erreur maximale commise à partir des critères actuels en instabilité est au maximum de 89%.

Cette différence est expliquée par le coefficient de réduction pour le flambement χ qui permet de prendre en compte l'imperfection initiale qui n'a pas été modélisé. Cependant, ce coefficient est défini pour une structure chargée à son maximum.

Afin de pallier ce problème, nous proposons de définir un nouveau coefficient de flambement χ^* permettant de prendre en compte l'imperfection initiale non modélisée tout en tenant compte du niveau de chargement réel de la structure. Ce nouveau coefficient de flambement sera accompagné de nouvelles formules d'interaction qui permettront de tenir compte de la capacité de la section transversale en lien avec sa classe. Ces nouvelles formules permettront une évaluation plus juste du facteur de sollicitation sans toutefois générer les imperfections initiales dans le modèle de la structure. Une nouvelle procédure de dimensionnement des barres comprimées fléchies sans déversement sera également proposée afin de permettre une lecture plus simple de la méthode de vérification.

3. Proposition d'une nouvelle procédure de dimensionnement des barres comprimées fléchies

Des procédures de calcul simplifiées ont déjà été proposées par plusieurs auteurs [PEN 98]. Cependant ces procédures concernent seulement certains types de structure temporaire. Elles ne sont pas généralisées à l'ensemble de ces structures.

Nous avons donc défini de nouvelles formules d'interaction pour les barres comprimées fléchies, qui permettent de tenir compte des imperfections initiales dans le calcul sans la nécessité de les générer dans le modèle, et applicables à l'ensemble des structures qui ne sont pas sensibles au déversement.

Pour cela, nous avons dans un premier temps défini de nouveaux coefficients de flambement χ^* , qui tiennent compte du niveau de chargement de la structure ainsi que du niveau de critère (élastique, plastique linéaire ou

fléchies

plastique non-linéaire). Ensuite, nous avons défini trois formules d'interaction pour les barres comprimées fléchies : une formule d'interaction élastique, une formule d'interaction plastique linéaire et une formule d'interaction plastique non-linéaire.

Pour accompagner ces nouvelles formules d'interaction, une procédure de dimensionnement des barres comprimées fléchies sera également proposée.

3.1. Nouveaux coefficients de flambement χ^* et nouvelles formules d'interaction pour les barres comprimées fléchies

Nous avons cherché à définir des formules d'interaction pour les barres comprimées fléchies permettant de tenir compte des imperfections initiales dans le calcul sans toutefois devoir les modéliser, mais permettant également d'avoir recours aux différents niveaux de capacité résistante de la section transversale en lien avec sa classe. Pour cela, nous avons donc défini trois coefficients de flambement χ^* .

Pour définir ces nouveaux coefficients de flambement χ^* , on considère, dans un premier temps, une poutre, avec imperfections initiales, simplement appuyée et sollicitée pour un effort de compression simple. Si l'on considère les capacités élastiques de la section, le critère de résistance élastique de cet élément s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{N_{Ed} \cdot e_0}{M_{el,Rd}} \times \frac{\alpha_{cr}}{\alpha_{cr} - 1} \leq 1 \quad [4]$$

avec :

$$e_0 = \alpha \times (\bar{\lambda} - 0,2) \times \frac{W_{el,y}}{A} \quad [5]$$

Ce critère peut être exprimé sous la forme d'un critère en instabilité, semblable à celui de l'Eurocode 3 pour les barres comprimées, avec l'expression suivante :

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{el}^* \cdot N_{Rd}} \leq 1 \quad [6]$$

avec :

$$\chi_{el}^* = \frac{1}{1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{\alpha_{cr}}{\alpha_{cr} - 1}} \quad [7]$$

Le critère [6] est ensuite étendu à un éléments comprimés fléchis grâce à l'expression suivante :

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{el}^* \cdot N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}^I}{M_{el,Rd}} \leq 1 \quad [8]$$

Les sollicitations N_{Ed} et M_{Ed} de ce critère sont déterminées à partir d'une analyse au second ordre. Dans le cas où seul une analyse au premier ordre est réalisée, il est possible d'écrire le critère suivant en utilisant le principe d'équivalence des moments :

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{el}^* \cdot N_{Rd}} + k_{yy}^* \frac{M_{Ed}^I}{M_{el,Rd}} \leq 1 \quad [9]$$

avec le facteur d'interaction k_{yy}^* suivant :

$$k_{yy}^* = \frac{C_m}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \quad [10]$$

L'ensemble de ces critères ont été déterminé en considérant les capacités élastiques de la section transversale. Il est possible d'appliquer le même raisonnement en considérant soit les capacités plastiques linéaires, soit les capacités plastiques non-linéaires de la section transversales. Les critères alors obtenus sont donnés dans le tableau 2.

Tableau 2. Coefficients de flambement et critères en instabilité avec résistances plastiques.

	Plastique linéaire	Plastique non-linéaire
Coefficient de flambement χ^*	$\chi_{pl,lin}^* = \frac{1}{1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}} \cdot \frac{\alpha_{cr}}{\alpha_{cr} - 1}}$	$\chi_{pl,non,lin}^* = \frac{1}{\alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}\right)} \cdot \frac{\alpha_{cr}}{\alpha_{cr} - 1}}$
Critère avec analyse au 2 nd ordre	$\frac{N}{\chi_{pl,lin}^* \cdot N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}^H}{M_{pl,Rd}} \leq 1$	$\frac{N}{\chi_{pl,lin}^* \cdot N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}^H}{M_{N,Rd}} \leq 1$
Critère avec analyse au 1 ^{er} ordre	$\frac{N}{\chi_{pl,lin}^* \cdot N_{Rd}} + k_{yy}^* \frac{M_{Ed}^I}{M_{pl,Rd}} \leq 1$	$\frac{N}{\chi_{pl,non,lin}^* \cdot N_{Rd}} + k_{yy}^* \frac{M_{Ed}^I}{M_{N,y,Rd}} \leq 1$

3.2. Procédure de calcul

Pour accompagner les formules d’interaction présentées précédemment, nous avons réalisé une procédure de calcul (Figure 4 pour les classes transversales 1 et 2 ; Figure 5 pour les classes transversales 3) permettant de connaître le critère à appliquer suivant la classe transversale, la modélisation ou non des imperfections initiales et le type d’analyse réalisé (1^{er} ou 2nd ordre).

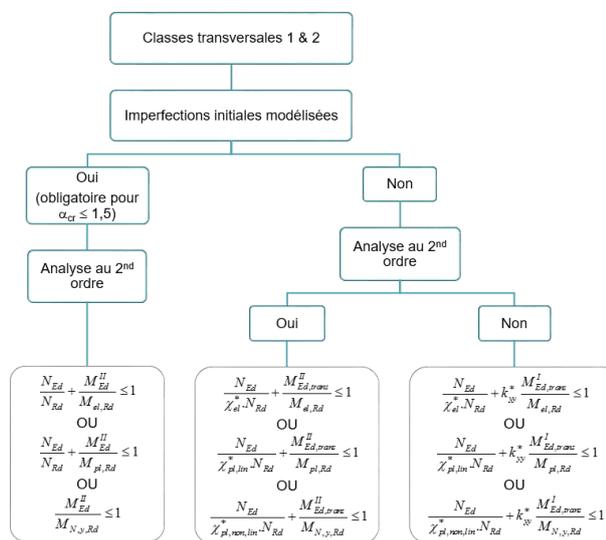


Figure 4. Procédure de dimensionnement des barres comprimées fléchies – classes transversales 1&2.

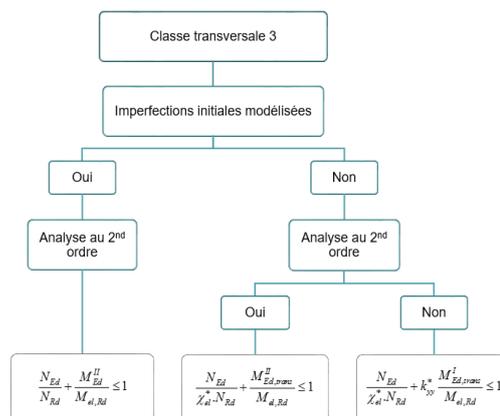


Figure 5. Procédure de dimensionnement des barres comprimées fléchies – classe transversale 3.

3.3. Application des nouvelles formules d’interaction

Ces nouvelles formules d’interaction ont été par la suite appliquées aux structures précédentes afin de pouvoir apprécier leur précision. Comme auparavant les calculs sur la Figure 5 sont ceux pour des critères élastiques ; les mêmes calculs ont été menés avec des critères plastique.

On constate que les résultats obtenus à partir des nouvelles formules d'interaction sont identiques aux résultats obtenus à partir d'une vérification en section lorsque les imperfections initiales sont générées dans le modèle. Les erreurs commises avec ces nouvelles formules d'interaction par rapport à la vérification en section sont données dans le tableau 3.

Tableau 3. Erreurs maximales et moyennes commises avec les nouveaux critères en instabilité (1^{er} et 2nd ordre).

		Critère élastique		Critère plastique linéaire		Critère plastique non-linéaire	
		2 nd ordre	1 ^{er} ordre	2 nd ordre	1 ^{er} ordre	2 nd ordre	1 ^{er} ordre
Tour autostable	Err. max.	+7,9%	+8,3%	+7,7%	+8%	+12,5%	+13%
	Err moy.	+6,6%	+6,5%	+6,2%	+6,5%	+9%	+8,8%
Echafaudage de façade	Err. max.	+15%	+15%	+11%	+13%	+13,5%	+16%
	Err. moy.	+9,4%	+12%	+7,8%	+7,3%	+9,8%	+9,2%

On peut ainsi constater que ces nouvelles formules d'interaction permettent de réduire l'erreur moyenne de 81% vis-à-vis de l'erreur moyenne commise avec les formules d'interaction de l'Eurocode 3.

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons mis en évidence que les dimensionnements réalisés partir des formules d'interaction pour les barres comprimées fléchies de l'Eurocode 3 (§6.3.3) sont surestimés vis-à-vis du dimensionnement en section lorsque les imperfections initiales sont générées dans le modèle de la structure.

Afin de pallier ce problème, nous avons défini des nouvelles formules d'interaction permettant d'estimer de manière plus précise et également plus transparente le facteur de sollicitation d'une structure, tout en s'affranchissant de la modélisation des imperfections initiales dans le modèle. Nous avons défini trois formules d'interaction (élastique, plastique linéaire et plastique non-linéaire) qui permettent également de s'adapter à la capacité de la classe de la section transversale de la structure étudiée. Une procédure de calcul est également proposée pour expliquer le principe de dimensionnement des barres comprimées fléchies. Elle permet de connaître le critère à appliquer selon la classe transversale de la section, la modélisation ou non des imperfections initiales ou encore le type de d'analyse effectué (1^{er} ou 2nd ordre). L'application de ces nouvelles formules d'interaction nous a permis de mettre en évidence qu'elles permettent l'obtention de résultats équivalents à une vérification en section lorsque les imperfections initiales sont générées dans le modèle de calcul.

5. Bibliographie

- [NF EN 1993-1-1] NF EN 1993-1-1, *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiment*, Afnor, 2005.
- [TC8 06] TC8, *Physical background to beam-columns formulae in EC3*, Afnor, 2006.
- [MAQ 01] MAQUOI R., BOISSONNADE N., MUZEAU J.P., VILLETTE M., « The interaction formulae for beam-columns: a new step of a yet long story », *Proceedings of the 2001 SSRC Annual Technical Session & Meetings*, 2001, p. 63-88.
- [BOI 02] BOISSONNADE N., JASPART J.P., VILLETTE M., « Improvement of the interaction formulae for beam-columns in Eurocode 3 », *Computers and Structures*, vol. 80, 2002, p. 2375-2385.
- [CHL 13] CHLADNÝ E., ŠTUJBEROVÁ M., « Frames with unique global and local imperfection in the shape of the elastic buckling mode (Part 1) », *Stahlbau*, vol. 82, issue 8, 2013, p. 609-617.
- [NF EN 128211-1] NF EN 12811-1, *Equipements temporaires de chantiers. Partie 1 : Echafaudages – Exigence de performance et étude en général*, Afnor, 2004.
- [PEN 98] PENG J.L., PAN A.D.E., CHAN S.L., « Simplified models for analysis and design of modular falsework », *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 48, 1998, p. 189-209.

fléchies

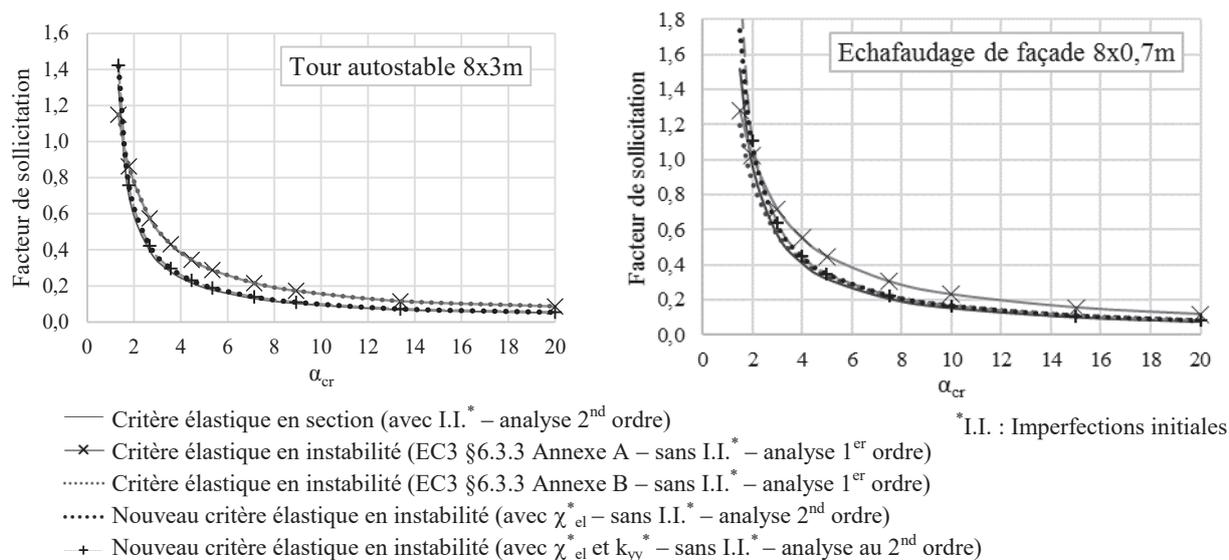


Figure 6. Résultats des nouvelles formulations d'interaction avec résistance élastique.

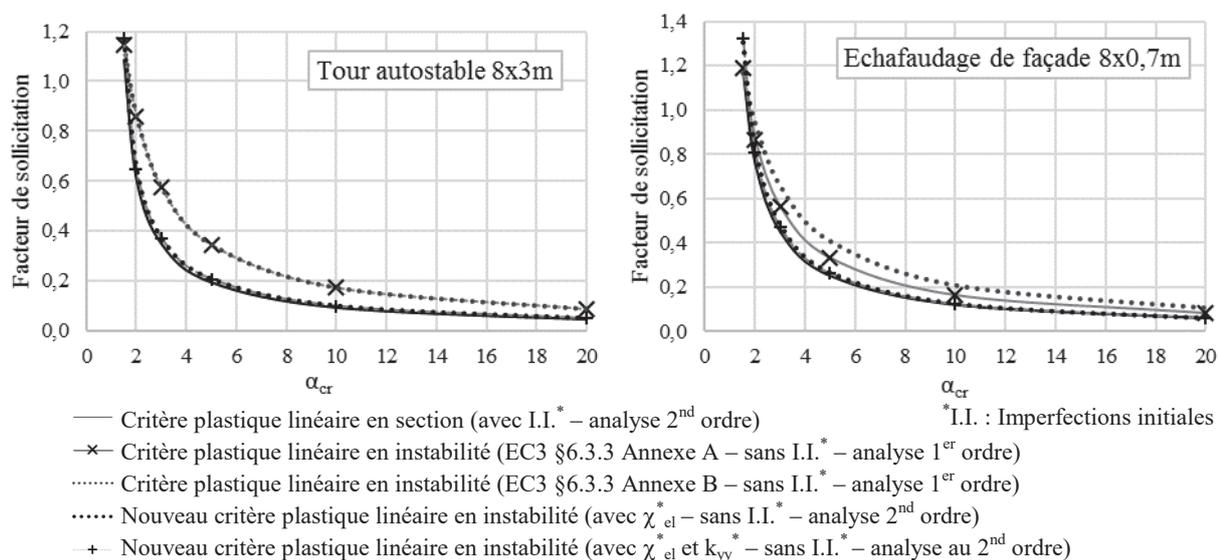


Figure 7. Résultats des nouvelles formulations d'interaction avec résistance plastique linéaire.

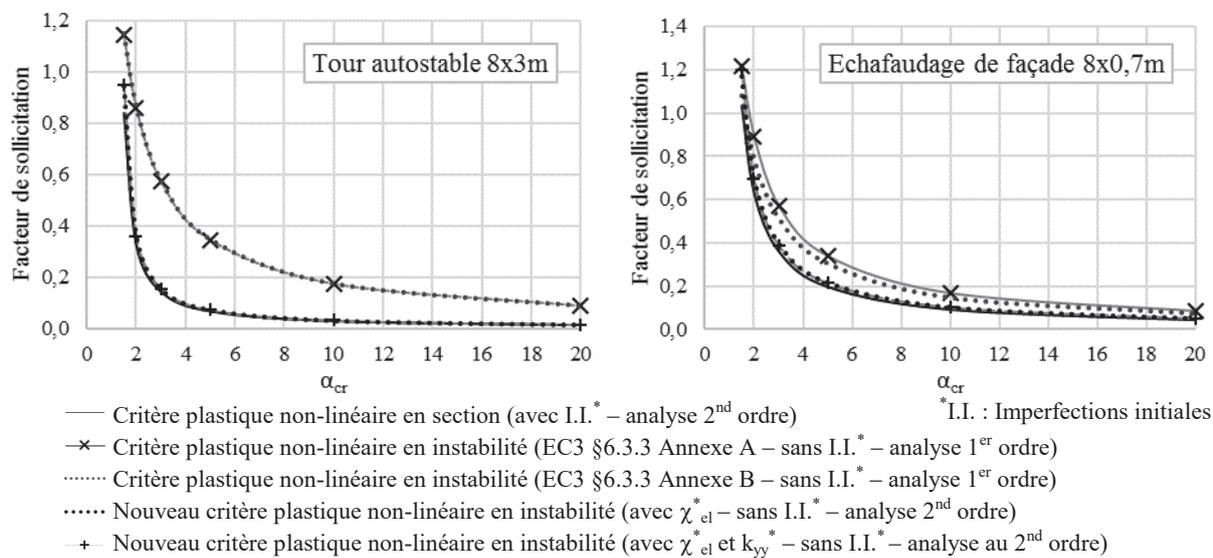


Figure 8. Résultats des nouvelles formulations d'interaction avec résistance plastique non-linéaire.