

Support de cours pour enseignants
d'Architecture et de Génie Civil

Module 7:
Applications structurales

Partie A :

**Applications structurales des
ronds à béton en acier inoxydable**

Voir aussi: stainlesssteelrebar.org

Le mauvais choix des matériaux peut
conduire à de gros problèmes





Un cas d'école : la corrosion de l'échangeur de l'autoroute Turcot à Montréal ^{1,2}

- Un échangeur clé à l'intersection des autoroutes Décarie (Nord-Sud) et Ville-Marie (Est-Ouest) construit en 1966.
- Plus de 300 000 véhicules par jour
- Réalisé en béton armé, il est aujourd'hui gravement corrodé par les sels de déverglaçage

Il a dû être remplacé

- En dépit de surveillance et de réparations constantes, il a dû être démolit
 - Coût estimé de l'ordre de 3 Milliards de Dollars Canadiens (CAD).
 - De plus, 254 Millions de CAD ont été dépensés pour assurer la sécurité jusqu'à son remplacement en 2018
- La durée de vie de la structure aura été de 50 ans seulement !

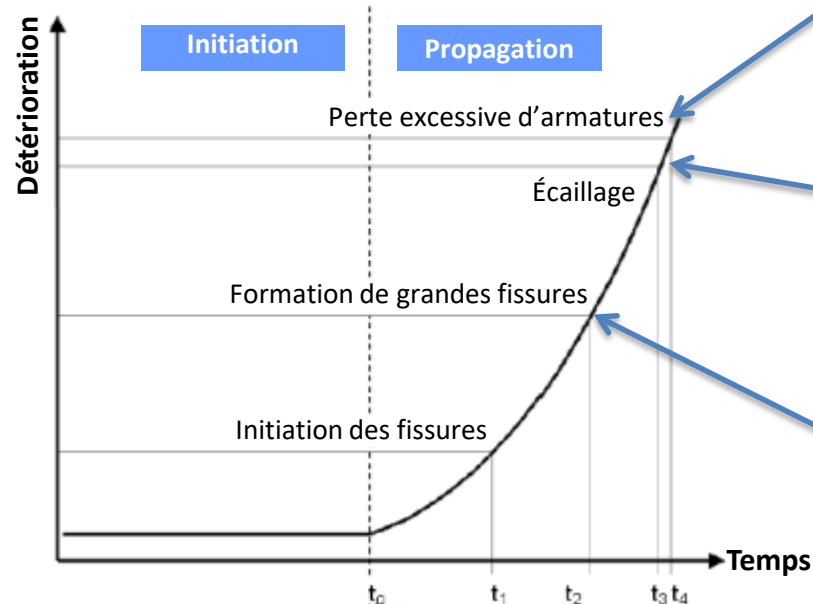


Comment le béton armé est endommagé par la corrosion

Diffusion des ions corrosifs (habituellement des chlorures) dans le béton :

Etapes³ :

1. Dès que les ions chlorures corrosifs ont atteint les armatures en acier au carbone, la corrosion commence (t_0)
2. Les produits de corrosion occupant un volume plus grand que l'acier, ils exercent une pression vers l'extérieur
3. Des fissures apparaissent dans le béton, facilitant ainsi l'entrée des chlorures (t_1)
4. Le béton d'enrobage se fissure (il s'écaille) exposant ainsi les armatures (t_3)
5. Si la corrosion continue sans être contrôlée, elle se poursuivra jusqu'à ce que les armatures ne puissent plus supporter les sollicitations de traction, et la structure s'effondrera (t_4)



Corrosion des armatures dans le béton²¹

- Dans le béton, un milieu à fort pH, et en l'absence de chlorures, l'acier au carbone reste passif (c.a.d. ne se corrode pas)
- Une faible teneur en chlorures est suffisante pour activer la corrosion de l'acier au carbone
- L'acier inox correctement choisi ne se corrodera jamais.
- Le couplage galvanique entre l'inox (anode) et l'acier au carbone (cathode) ne contribue que pour environ ~1% à la corrosion globale*. Il est par conséquent négligeable
- Le type d'acier, la température, les conditions locales, l'épaisseur du recouvrement, etc... influent fortement sur la cinétique de corrosion des armatures en acier au carbone

* Une bibliographie spécifique est fournie à la fin de cette partie.

Les fissures du béton armé accélèrent la corrosion

Le béton armé présente souvent des fissures qui facilitent l'accès des ions corrosifs jusqu'aux ronds à béton.

Voici, à droite, quelques causes de formation de fissures (réf. 4).

Il est à noter que ces fissures n'apparaissent pas immédiatement et qu'elles peuvent se produire dans des zones inaccessibles où elles ne peuvent pas être réparées.

Type de fissuration	Forme des fissures	Cause primaire	Temps d'apparition
Tassement plastique	Au-dessus et superposées aux armatures	Tassement autour des armatures ; eau en excès dans le malaxeur	De 10 minutes à 3 heures
Retrait plastique	Diagonales ou aléatoires	Évaporation précoce excessive	De 30 minutes à 6 heures
Dilatation thermique puis rétraction	Transversales (exemple : au travers de la chaussée)	Échauffement excessif ou variations de température	De 1 jour à 2 ou 3 semaines
Retrait de séchage	Transversales ou en réseau	Eau en excès dans le malaxeur ; mauvaise disposition des joints ; joints trop espacés	Quelques semaines, voire quelques mois
Gel et dégel	Parallèles à la surface du béton	Entraîneur d'air inadéquat ; graviers non durables	Après un hiver ou plus
Corrosion des armatures	Au-dessus des armatures	Enrobage inadéquat ; pénétration d'humidité ou de chlorures	Plus de 2 ans
Alcali-réaction des granulats	En réseau ; parallèles aux joints ou aux arêtes	Granulats réactifs plus humidité	Généralement plus de 5 ans mais peut être beaucoup plus précoce avec des granulats hautement réactifs
Attaque par les sulfates	En réseau	Sulfates internes ou externes provoquant la formation d'ettringite	Entre 1 et 5 ans

Aujourd'hui, les grands ouvrages de
Génie Civil sont conçus pour durer
plus de 100 ans

Pont Haynes Inlet Slough, Oregon, USA, 2004^{7,8}

Structure inhabituelle : pont en arcs à deux articulations avec 400 tonnes de ronds à béton en acier inoxydable dans le tablier.

Ce pont, d'une longueur de 230 m au-dessus de la Haynes Inlet Slough, a été conçu pour une durée de vie de 120 ans sans entretien.

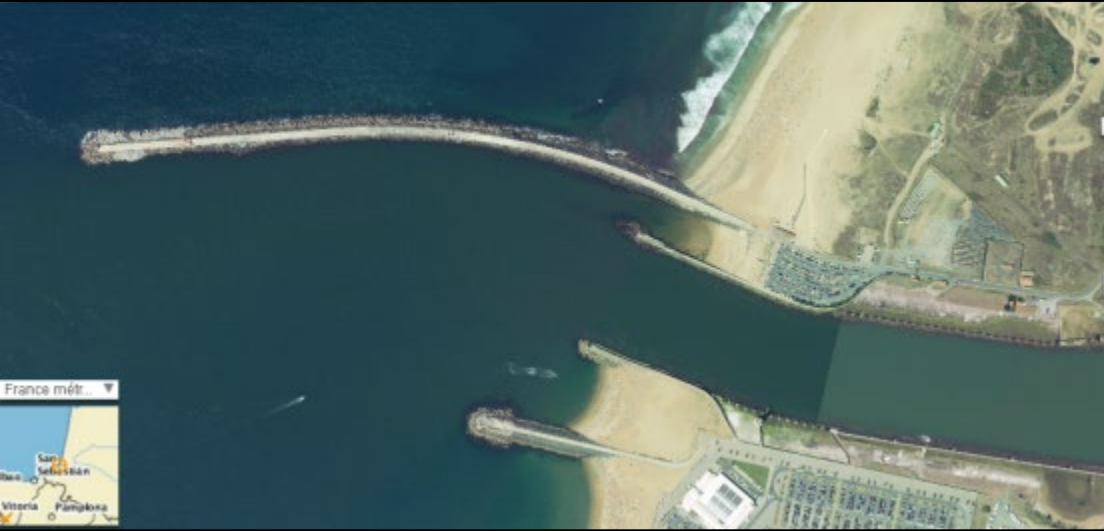
Même si le coût de l'acier inoxydable est beaucoup plus important que celui de l'acier traditionnel, le coût du cycle de vie du pont sera considérablement réduit.





Pont Broadmeadow à Dublin, Irlande (2003)¹⁰

Nouvel ouvrage construit au-dessus de l'estuaire utilisant 105 tonnes d'acier inoxydable dans les piles et les parapets.



Vue aérienne

Fissures à réparer sur le quai et le mur



Réparation de la digue de Bayonne, France

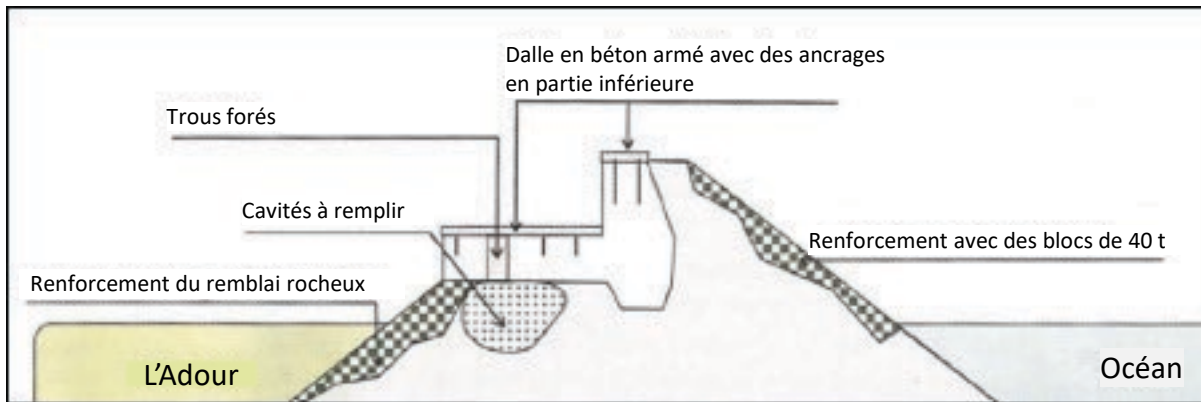
Digue construite dans les années 1960 pour protéger l'entrée du port

Le côté océan est plus haut et il est protégé par des blocs de 40 t qui doivent être remplacés au fur et à mesure de leur usure par les tempêtes.

Du côté rivière, une plate-forme de 7 m de large permet aux grues à forte capacité de soulever les blocs



Coupe de la digue



Réparation de la digue de Bayonne, France

La plateforme et le mur de quai ont été renforcés par des ronds à béton en inox «lean duplex» (EN 1.4362)¹¹

Travaux de réparation de la digue



Vue d'une tempête frappant la digue début 2014





Pont Belt Parkway à Brooklyn, USA (2004)¹⁴

Pour garantir résistance et durabilité à long terme (100 ans) contre les attaques corrosives de l'environnement maritime de la zone et contre les sels de déverglaçage routiers, les travées du pont et les garde-corps ont été renforcés avec des ronds à béton en acier inoxydable de nuance 2205.

Quand est-ce que l'utilisation de ronds à béton en acier inoxydable doit être envisagée¹⁵⁻²⁰ ?

Dans les environnement corrosifs :

- Eau de mer et plus encore dans les climats chauds
 - ponts
 - jetées
 - quais
 - ancrages de candélabres, balustrades....
 - digues
 -
- Sels de déverglaçage
 - ponts
 - viaducs et échangeurs
 - parcs de stationnement
- Réservoirs de retraitement des eaux usées
- Usines de dessalement de l'eau de mer
- Structures à très grande durée de vie
 - réparation des monuments historiques
 - dispositifs de stockage de déchets radioactifs
- Dans les environnements mal connus dans lesquels :
 - l'inspection est impossible,
 - les réparations sont presque impossibles ou très coûteuses

Comparaison du rond à béton en acier inoxydable avec des solutions alternatives¹⁵⁻²⁰

	Avantages	Inconvénients
Revêtements époxy	Coût initiaux plus faibles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ne peuvent pas être pliés sans fissurer ▪ Exigent d'être manipulés avec précaution pour éviter de les endommager pendant la mise en place
Galvanisation	Coût initiaux plus faibles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ne peuvent pas être pliés sans fissuration ▪ Ne sont plus efficaces lorsque le revêtement de zinc a été corrodé
Polymères renforcés par des fibres	Coût initiaux plus faibles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ne peuvent pas être pliés sans fissuration ▪ Aucune résistance à la chaleur et très faible résilience (résistance aux chocs) lors d'hivers rudes ▪ Rigidité plus faible que celle de l'acier ▪ Ne peuvent pas être recyclés
ACIER INOXYDABLE	Faible coût du cycle de vie : <ul style="list-style-type: none"> • Conception similaire à celle des aciers au carbone • Les armatures inox et aciers au carbone sont parfaitement compatibles • Installation simple, insensible à une pose pas très bien exécutée • Pas d'entretien • Pas de limite de durée de vie • Autorise un enrobage plus mince • Meilleure résistance au feu • Recyclable à 100 % en acier inoxydable de qualité égale 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût initial plus important mais pas plus que quelques % lorsque <ul style="list-style-type: none"> ✓ L'acier inoxydable est utilisé dans les zones critiques seulement ✓ Des nuances « lean duplex » sont retenues

Comparaison du rond à béton en acier inoxydable avec des solutions alternatives¹⁵⁻²⁰

	Avantages	Inconvénients
Protection cathodique	Coût initiaux plus faibles ? Souvent utilisé en réparation	<ul style="list-style-type: none">▪ Exige des calculs précis pour une protection globale▪ Exige une installation soignée pour conserver de bons contacts électriques▪ Exige une source permanente de courant (qui doit être surveillée et entretenue) ou des anodes sacrificielles qui demandent surveillance et remplacement lorsque nécessaire
Membranes/ produits d'étanchéité	Coût initiaux plus faibles ?	<ul style="list-style-type: none">▪ Exigent une mise en œuvre soignée (bulles)▪ Ne peuvent pas être appliquées par tous les temps▪ La performance dans le temps est discutable▪ Limitées aux surfaces horizontales

Références

1. <http://www.lapresse.ca/actualites/montreal/201111/25/01-4471833-echangeur-turcot-254-millions-pour-lentretien-avant-la-demolition.php>
2. <http://www.ledevoir.com/politique/quebec/336978/echangeur-turcot-quebec-confirme-le-mauvais-etat-des-structures>
3. http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education_references/Ref07_The_use_of_predictive_models_in_specifying_selective_use_of_stainless_steel_reinforcement.pdf
4. <https://www.holcim.com.au/products-and-services/tools-faqs-and-resources/do-it-yourself-diy/cracks-in-concrete> visual inspection of concrete
5. <https://www.nickelinstitute.org/policy/nickel-life-cycle-management/life-cycle-assessments/> (Progreso Pier)
6. http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education_references/Ref08_Special-issue-stainless-steel-rebar-Acom.pdf
7. <https://www.roadsbridges.com/willing-bend-0> (Oregon)
8. <http://structurae.net/structures/data/index.cfm?id=s0011506> (Oregon)
9. <http://www.aeonline.ae/major-hong-kong-stainless-steel-rebar-contract-signed-by-arminox-middle-east-42317/news.html> (HK Macau)
10. <http://www.engineersireland.ie/EngineersIreland/media/SiteMedia/groups/Divisions/civil/Broadmeadow-Estuary-Bridge-Integration-of-Design-and-Construction.pdf?ext=.pdf> (Broadmeadow)
11. Courtesy Ugitech SA
12. http://www.arup.com/Projects/Stonecutters_Bridge.aspx (stonecutters'bridge)
13. http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Stonecutters_Bridge_Case_Study-2.pdf (stonecutters'bridge)
14. http://www.cif.org/noms/2008/24_-_Ocean_Parkway_Belt_Bridge.pdf (belt parkway bridge)
15. Béton Armé d'inox: Le Choix de la durée <https://www.infociments.fr/ponts-et-passerelles/les-armatures-inox-la-solution-pour-des-ouvrages-durables>
16. Armaduras de Acero Inoxidable (in Spanish) <http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/59armadurasaceroinoxidable.pdf>
17. www.ukcares.com/downloads/guides/PART7.pdf
18. http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education_references/Ref19_Case_study_of_progreso_pier.pdf
19. <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Publikasjoner/Prrapp%20405.pdf> (general)
20. http://americanarminox.com/Purdue_University_Report_-_Stainless_Steel_Life_Cycle_Costing.pdf (advantages of using ss rebar)
21. <http://www.stainlesssteelrebar.org>

Nouveau!

Références sur le couplage galvanique

1. L. Bertolini, M. Gastaldi, T. Pastore, M. P. Pedferri and P. Pedferri, "Effects of Galvanic Coupling between Carbon Steel and Stainless Steel Reinforcement in Concrete", International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, 1998, Orlando, Florida.
2. A. Knudsen, EM. Jensen, O. Klinghoffer and T. Skovsgaard, "Cost-Effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent use of Stainless Steel Reinforcement", International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, 1998, Orlando, Florida.
3. L. Bertolini, M. Gastaldi, T. Pastore and M. P. Pedferri, "Effect of Chemical Composition on Corrosion Behaviour of Stainless Steel in Chloride Contamination and Carbonated Concrete", Properties and Performances, Proceedings of 3rd European Congress Stainless Steel '99, 1999, Vol .3, Chia Laguna, AIM
4. O. Klinghoffer, T. Frolund, B. Kofoed, A. Knudsen, EM. Jensen and T. Skovsgaard, "Practical and Economic Aspects of Application of Austenitic Stainless Steel, AISI 316, as Reinforcement in Concrete", Corrosion of Reinforcement in Concrete: Corrosion Mechanisms and Corrosion Protection, 2000, Mietz, J., Polder, R. and Elsener, B., Eds, London
5. Knudsen and T. Skovsgaard, "Stainless Steel Reinforcement", Concrete Engineering, 2001, Vol. 5 (3), p. 59.
6. L. Bertolini and P. Pedferri, "Laboratory and Field Experience on the Use of Stainless Steel to Improve Durability of Reinforced Concrete", Corrosion Review, 2002, Vol. 20, p. 129
7. [S. Qian](#), [D. Qu](#) & [G. Coates](#) Galvanic Coupling Between Carbon Steel and Stainless Steel Reinforcements [Canadian Metallurgical Quarterly](#) Volume 45, 2006 - [Issue 4](#) Pages 475-483 Published online: 18 Jul 2013
8. J.T. Pérez-Quiroz, J. Teran, M.J. Herrera, M. Martinez, J. Genesca : "Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation" J. of Constructional Steel research (2008) doi:10.1016/j.jcsr.2008.07.024
9. Juliana Lopes Cardoso / Adriana de Araujo / Mayara Stecanella Pacheco / Jose Luis Serra Ribeiro / Zehbour Panossian "stainless-steel-rebar-for-marine-environment-a-study-of-galvanic-corrosion-with-carbon-steel-rebar-used-in-the-same-concrete-structure" (2018) <https://store.nace.org/stainless-steel-rebar-for-marine-environment-a-study-of-galvanic-corrosion-with-carbon-steel-rebar-used-in-the-same-concrete-structure> Product Number: 51318-11312-SG
10. <http://stainlesssteelrebar.org/>

Partie B

Conception de structures en acier inoxydable

L'acier inoxydable structural

Conception et calcul avec l'acier inoxydable

Barbara Rossi & Maarten Fortan
Département de Génie Civil,
KU Leuven, Belgique

A partir d'une précédente version rédigée par Nancy Baddoo
Steel Construction Institute, Ascot, GB



Plan

- Exemples d'applications structurales
- Caractéristiques mécaniques du matériau
- Calculs selon l'Eurocode 3
- Méthodes alternatives
- Flèches
- Informations complémentaires
- Ressources pour les ingénieurs



Partie 1

Exemples d'applications structurales



Gare de Gand-Saint-Pierre (Belgique)

Architecte : Wefirna

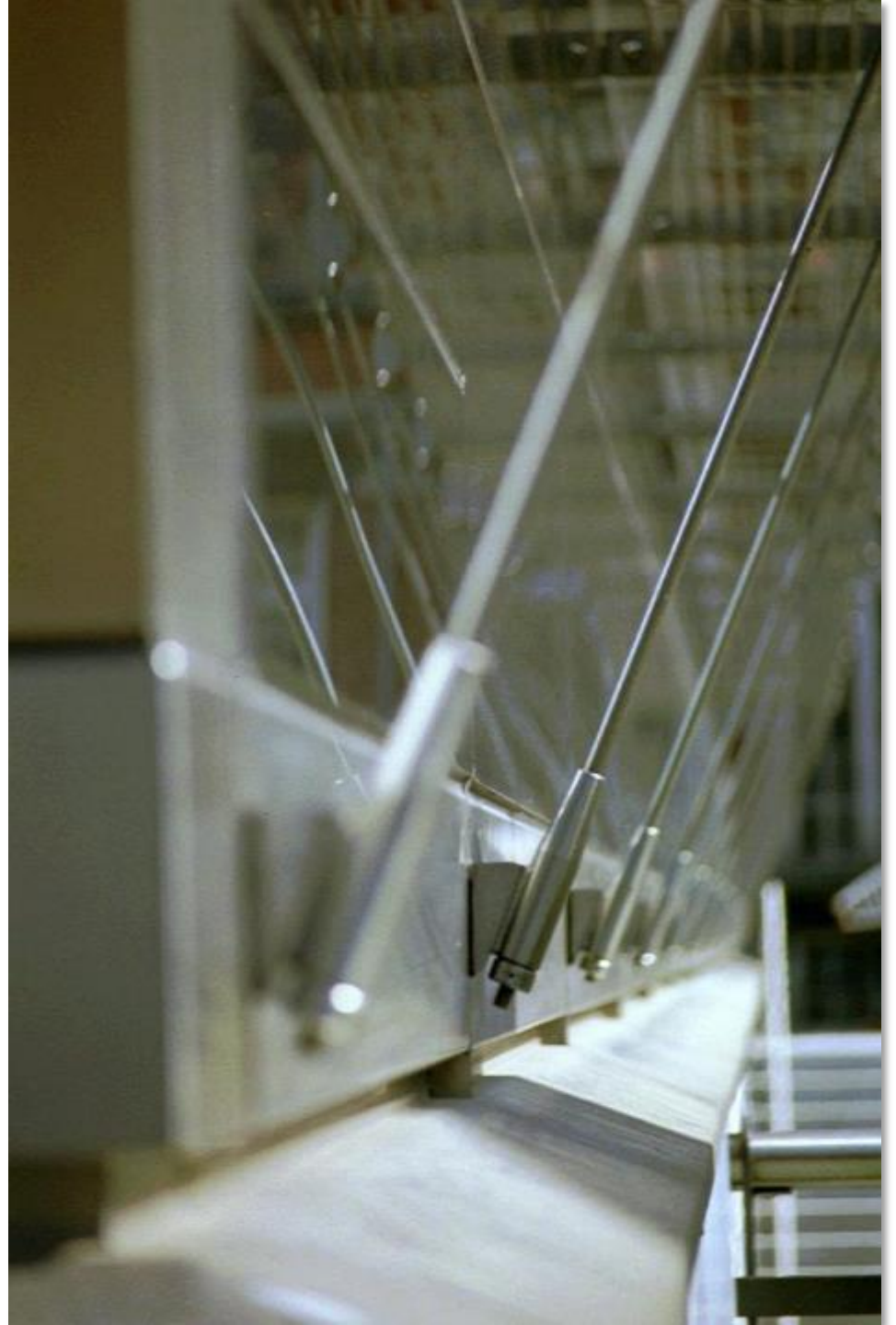
Bureau d'études : THV Van Laere-Braekel Aero

École royale militaire de Bruxelles (Belgique)



Architecte : AR.TE

Bureau d'études : Tractebel Development



La Grande Arche de La Défense, Paris (France)

Architecte : Johan Otto von Spreckelsen

En acier inoxydable :

Le nuage (structure métallo-textile)

Bureau d'études :

Paul Andreu et François Deslaugiers, ADP





Villa Inox à Tuusula (Finlande)

Lentille du métro Saint-Lazare, Paris (France)

Architecte : Arte Charpentiers & Associés

Bureau d'études : Mitsu Edwards, RFR



Gare de Porto (Portugal)



Siège de Torno Internazionale S.P.A., Milan (Italie)

Architecte : Dante O. Benini & Partenaires

Acier inoxydable EN 1.4404



Photo : Toni Nicolino / Nicola Giacomini

**Portiques en acier
inoxydable dans une
centrale nucléaire**



Photo: Stainless Structurals LLC

Appuis de façade en acier inoxydable, Tampa (USA)



Photo : TriPyramid Structures, Inc.

« Thames Gateway Water Treatment Works », usine de traitement d'eau à Beckton, Londres (GB)

Poutrelles en I en acier inoxydable



Photo : Interserve0

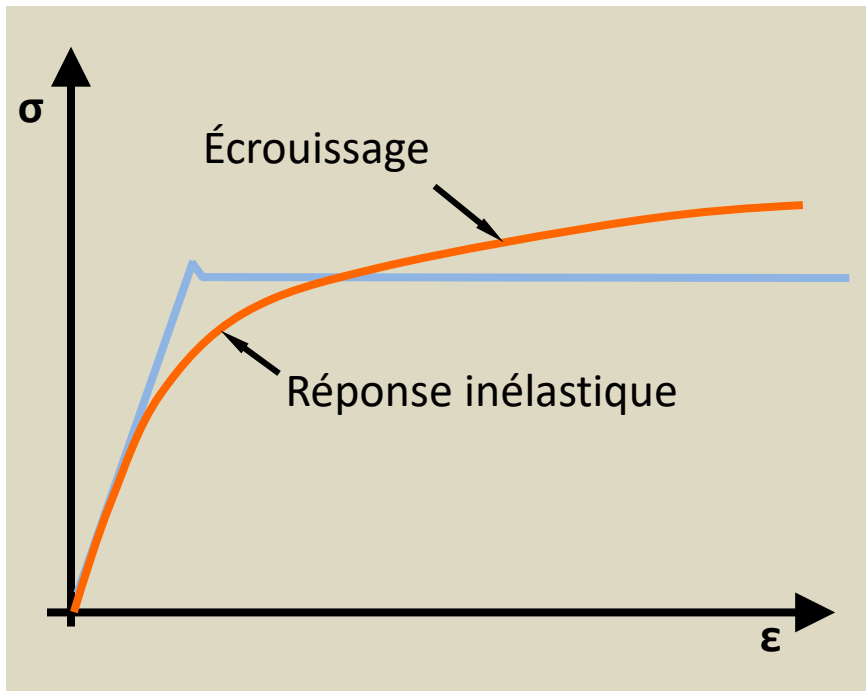


Partie 2

Caractéristiques mécaniques des matériaux

Caractéristiques contrainte-déformation : aciers au carbone / aciers inoxydables

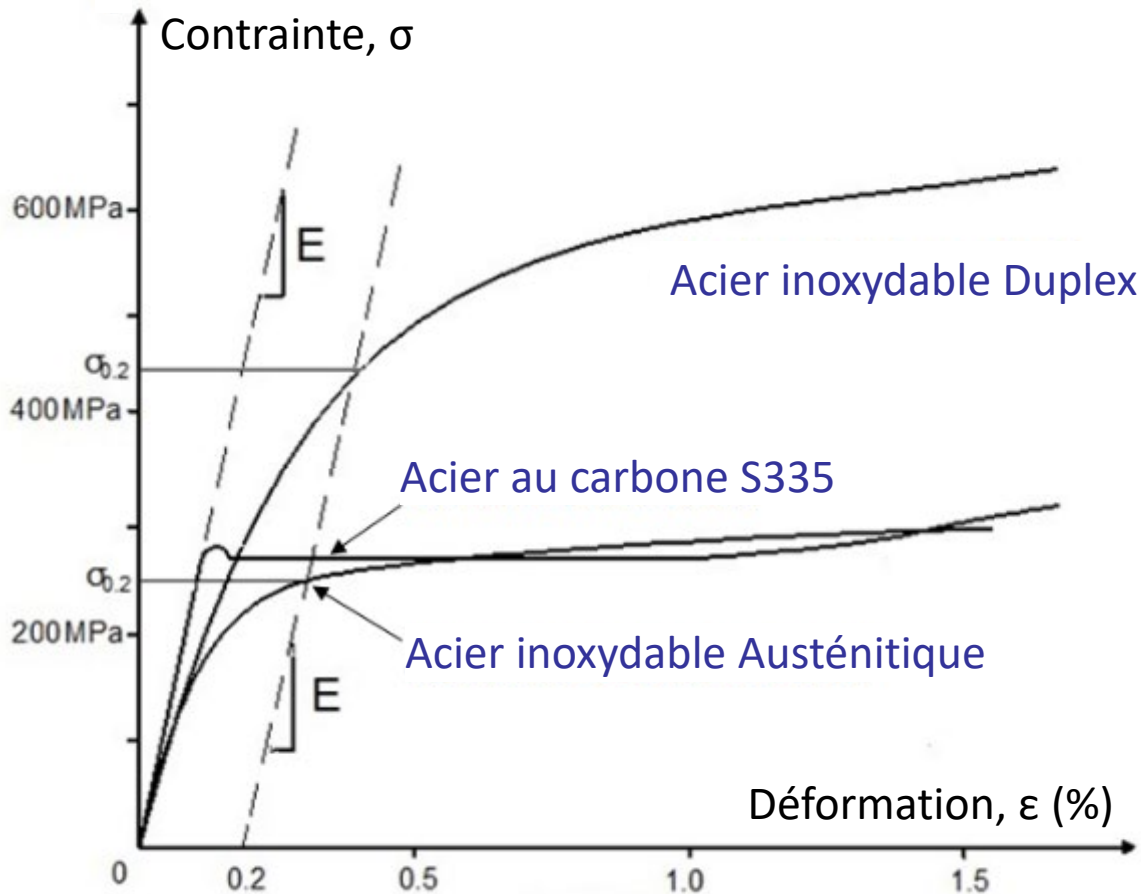
La loi de comportement σ - ε des aciers inoxydables est fondamentalement différente de celle des aciers au carbone



L'acier au carbone présente une limite d'élasticité très nette suivie d'un plateau plastique.

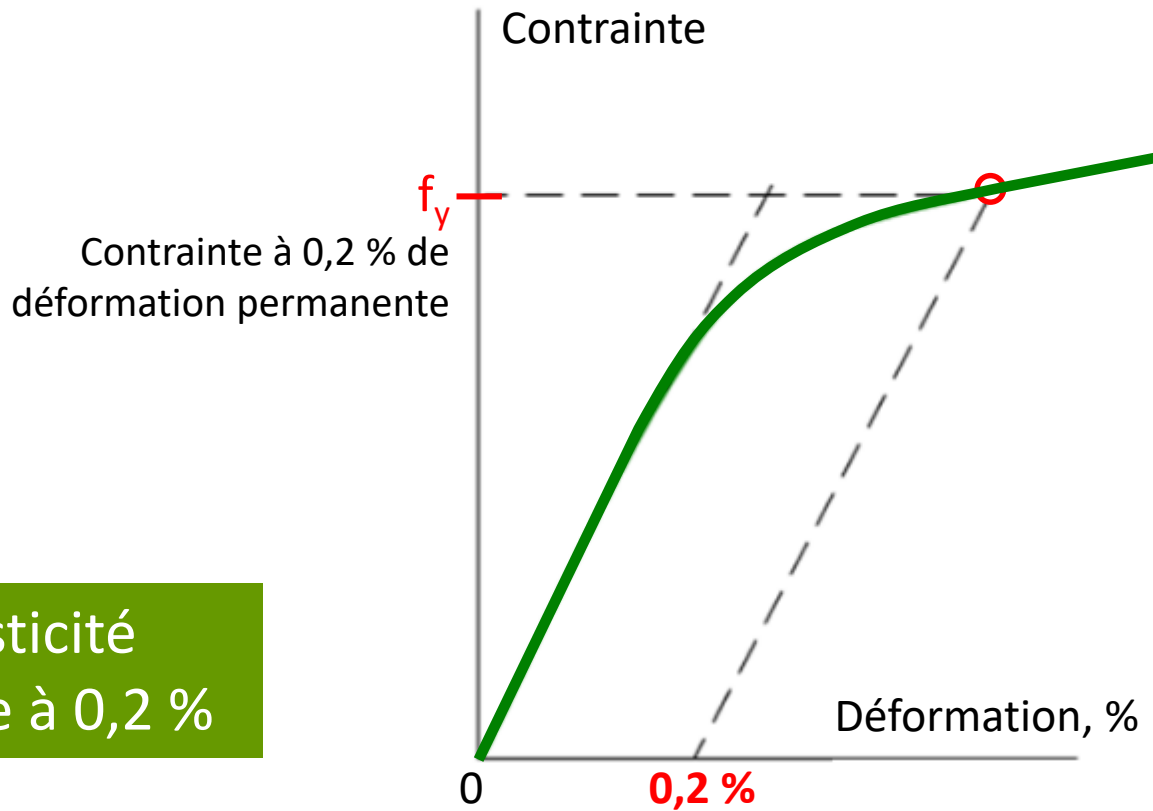
L'acier inoxydable présente un comportement plastique progressif avec un fort écrouissage.

Caractéristiques contrainte-déformation : petites déformations



La réponse contrainte-déformation dépend de la famille et de la nuance de l'acier

Quelle est la limite d'élasticité pour le calcul ?



f_y = limite d'élasticité
conventionnelle à 0,2 %

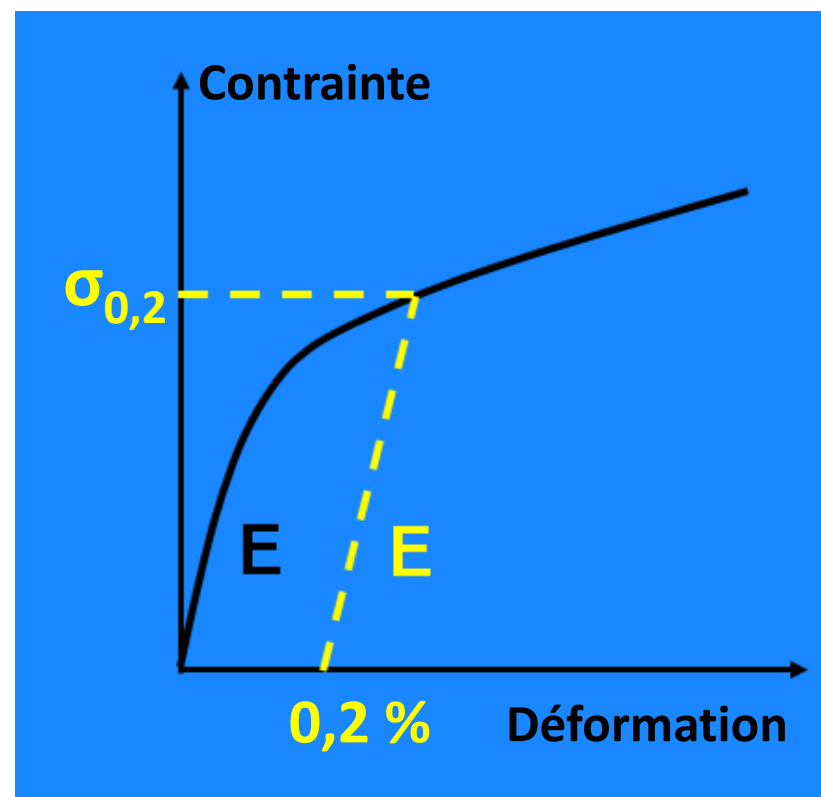
Résistance de calcul de l'acier inoxydable

Les valeurs minimales spécifiées des limites d'élasticité conventionnelles à 0,2 % sont données dans les EN 10088-4 et -5

Austénitiques : $f_y = 220$ à 350 MPa

Duplex : $f_y = 400$ à 480 MPa

Module de Young : $E = 200\ 000$ à $220\ 000$ MPa



Caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable

Nuance	Limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % (MPa)	Résistance ultime (MPa)	Module de Young (GPa)	Déformation à rupture (%)
1.4301 (304)	210	520	200	45
1.4401 (316)	220	520	200	40



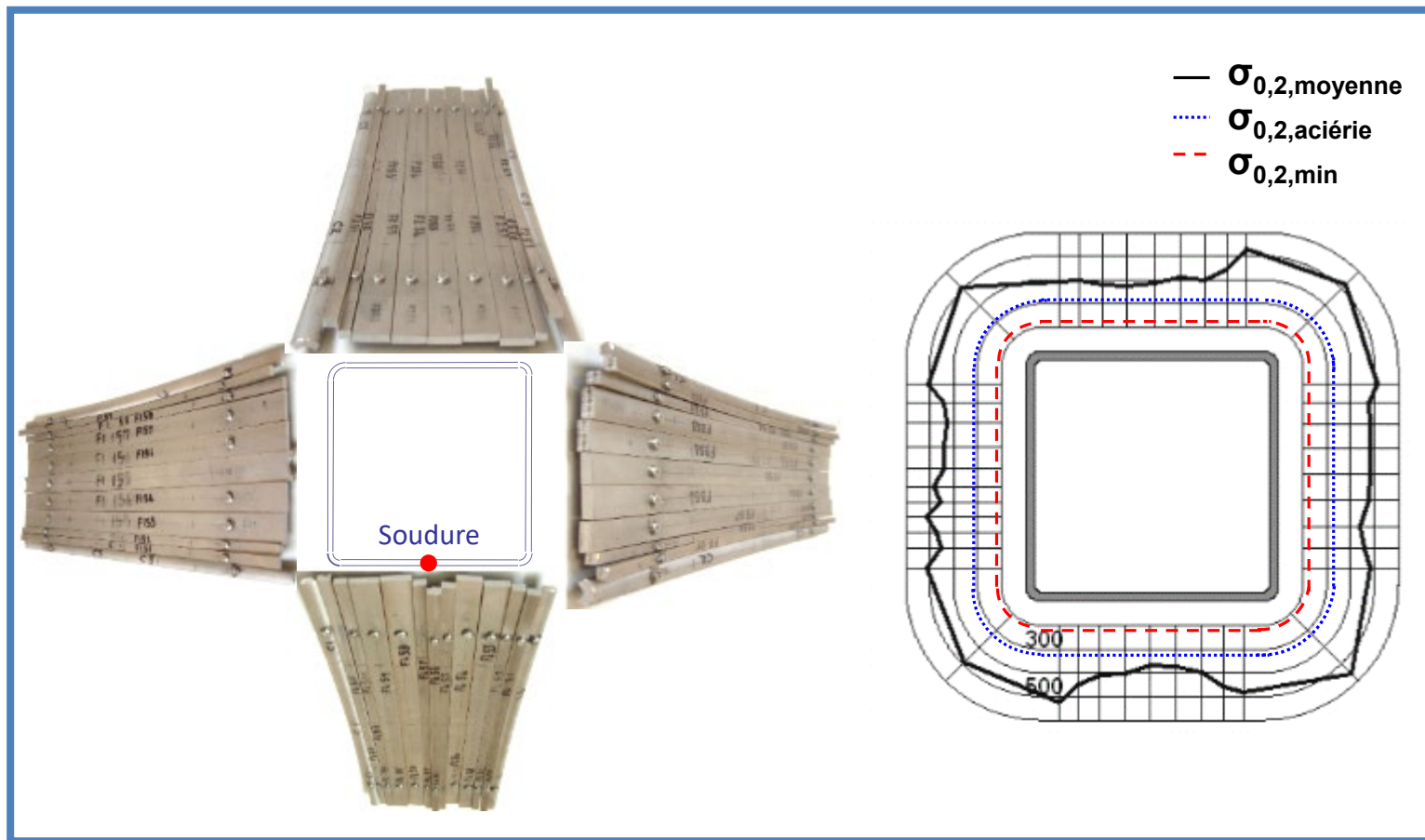
Écrouissage (lors de la production de l'acier ou du laminage à froid)

- Il entraîne une augmentation de la résistance mécanique du fait des déformations plastiques
- Il résulte du laminage à froid pendant les opérations de fabrication de l'acier dans l'aciérie ou de la déformation pendant la mise en forme

Lors de la fabrication des sections creuses rectangulaires, la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % augmente d'environ 50 % dans les angles des sections du fait du formage à froid !

Écrouissage (lors de déformation à froid)

- Augmentation de la résistance pendant la mise en forme

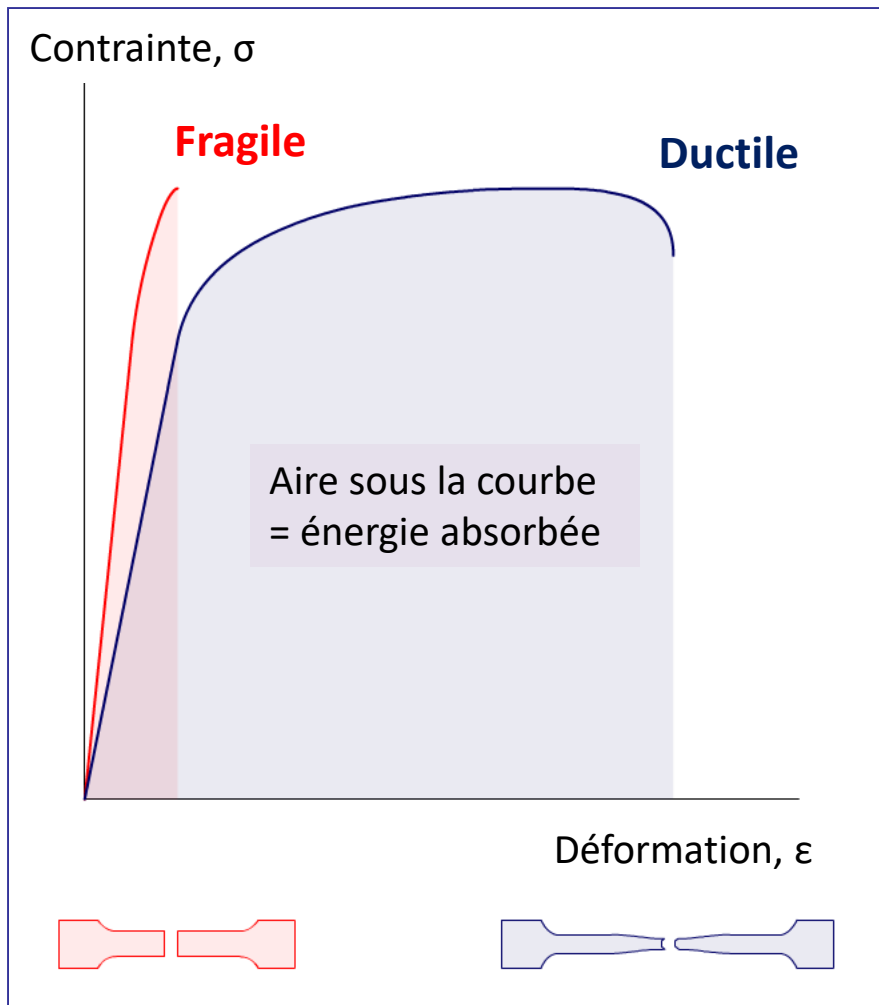




L'écrouissage – il n'est pas toujours utile

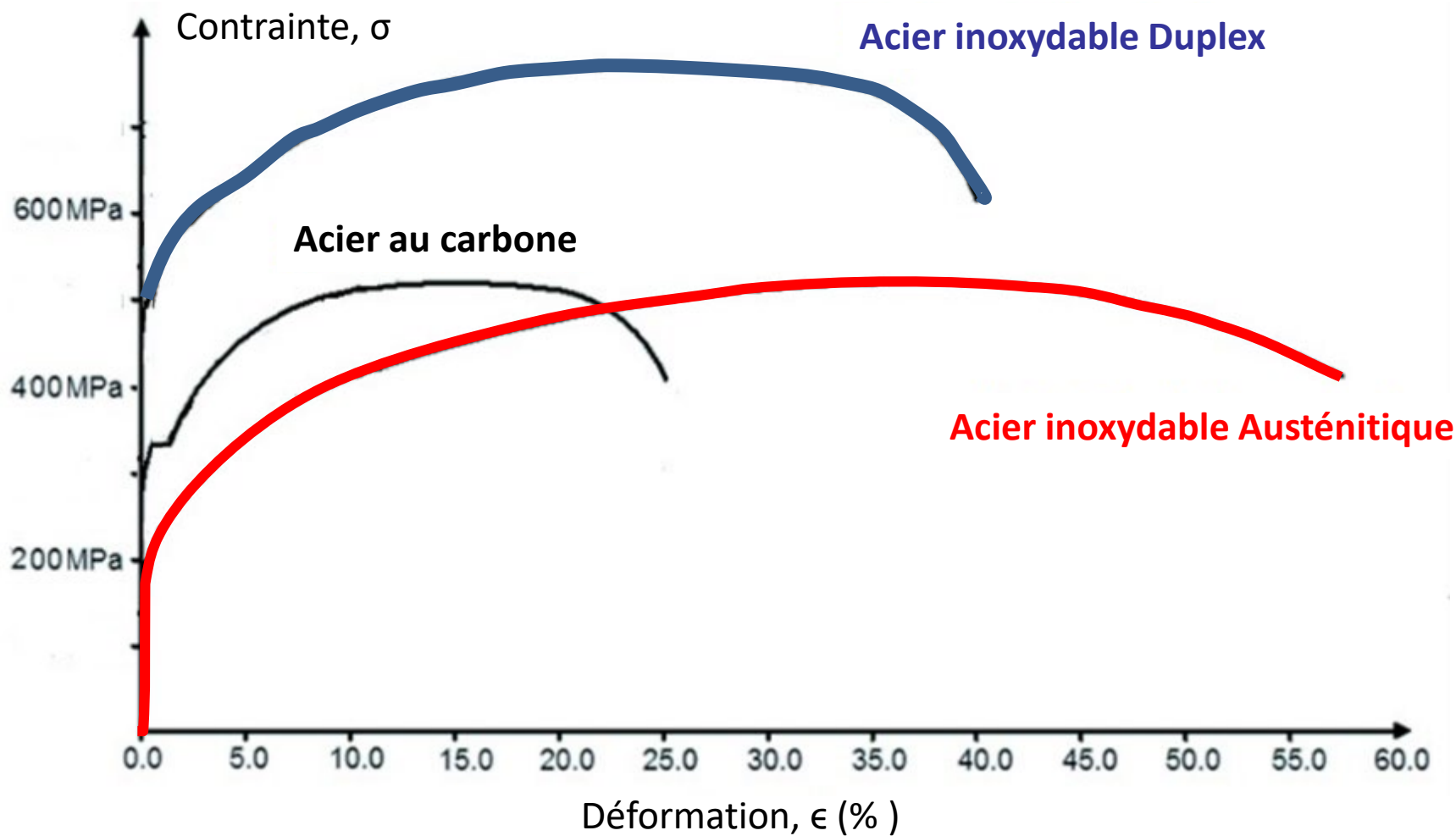
- Il exige des équipements de fabrication plus lourds et plus puissants
- Il nécessite des efforts plus importants
- Il réduit la ductilité (mais celle-ci est initialement élevée, particulièrement pour les austénitiques)
- Il peut entraîner des contraintes résiduelles indésirables

Ductilité et ténacité



- **Ductilité** – capacité de s’allonger sans se rompre
- **Ténacité** – capacité d’absorber de l’énergie et de se déformer plastiquement sans fissurer

Caractéristiques contrainte-déformation : grandes déformations



Structures résistantes aux explosions et aux chocs



Bornes de sécurité



Panneaux trapézoïdaux résistant aux explosions.
Ils sont destinés à des superstructures de plates-
formes offshore



Caractéristiques contrainte-déformation

La non-linéarité... entraîne :

- des limites différentes pour les rapports largeur-épaisseur pour le voilement local
- des comportements différents au flambement pour les barres comprimées et fléchies
- des flèches plus grandes



Impact sur la performance au flambement

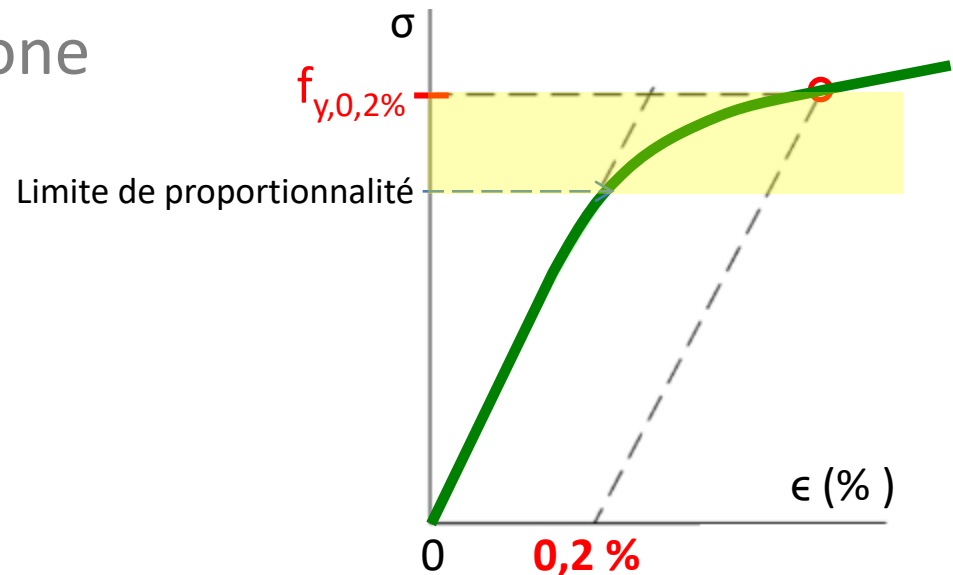
- Pour les **faibles élancements** :
Les poteaux atteignent/dépassent la charge d'écrasement
→ les **bénéfices** de l'écrouissage sont très nets.
Les aciers inoxydables se comportent au moins aussi bien que les aciers au carbone
- Pour les **grands élancements** :
La résistance sous charges axiales reste faible. Les contraintes restent dans le domaine linéaire (élastique)
Les aciers inoxydables se comportent **de manière similaire** aux aciers au carbone, sous réserve que la géométrie et les contraintes résiduelles soient similaires

Impact sur la performance au flambement

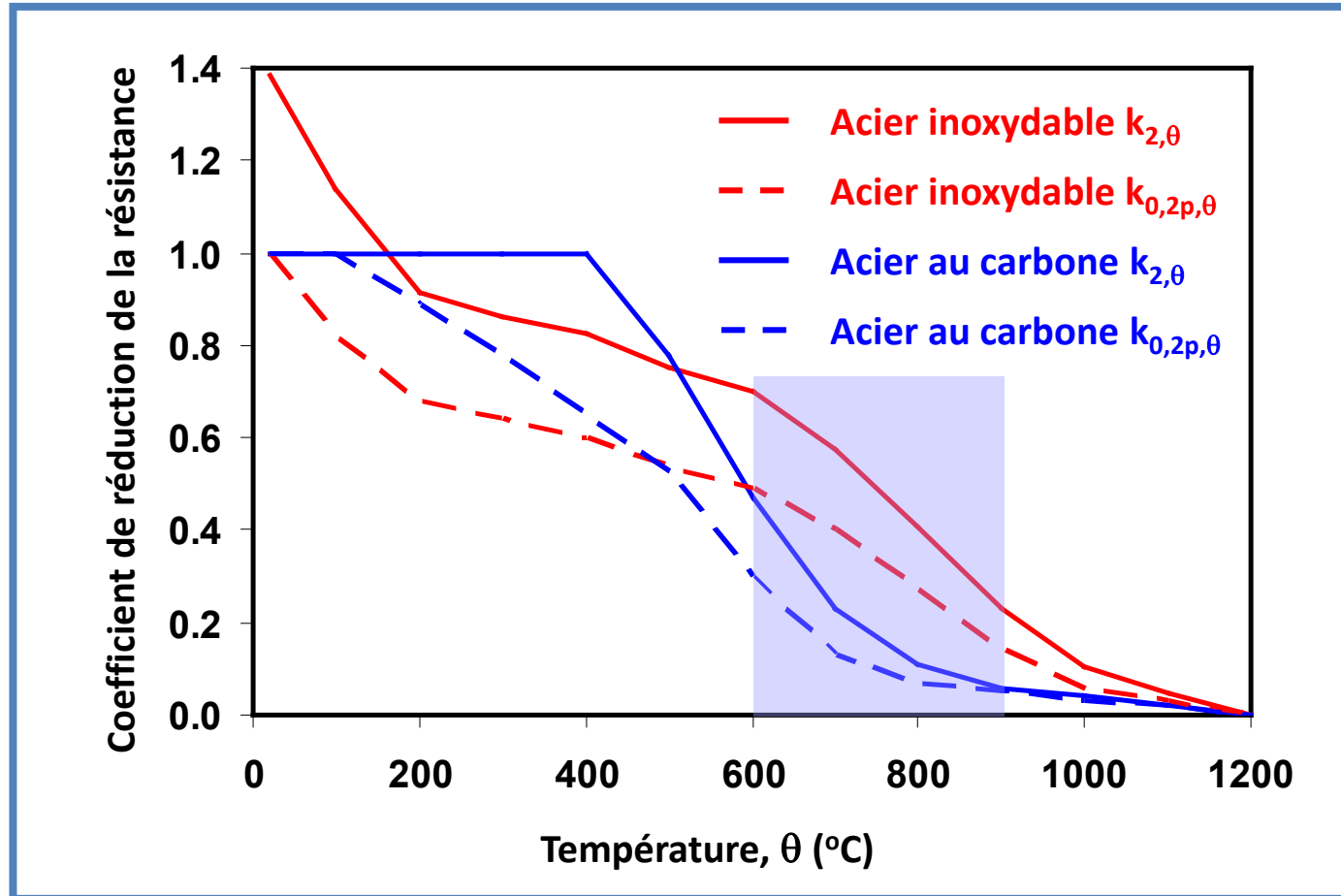
- Pour les **élancements intermédiaires** :

La contrainte moyenne dans le poteau varie entre la limite de proportionnalité et la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 %.

Dans cette zone, les poteaux en acier inoxydable présentent **une résistance inférieure à celle** des poteaux en acier au carbone



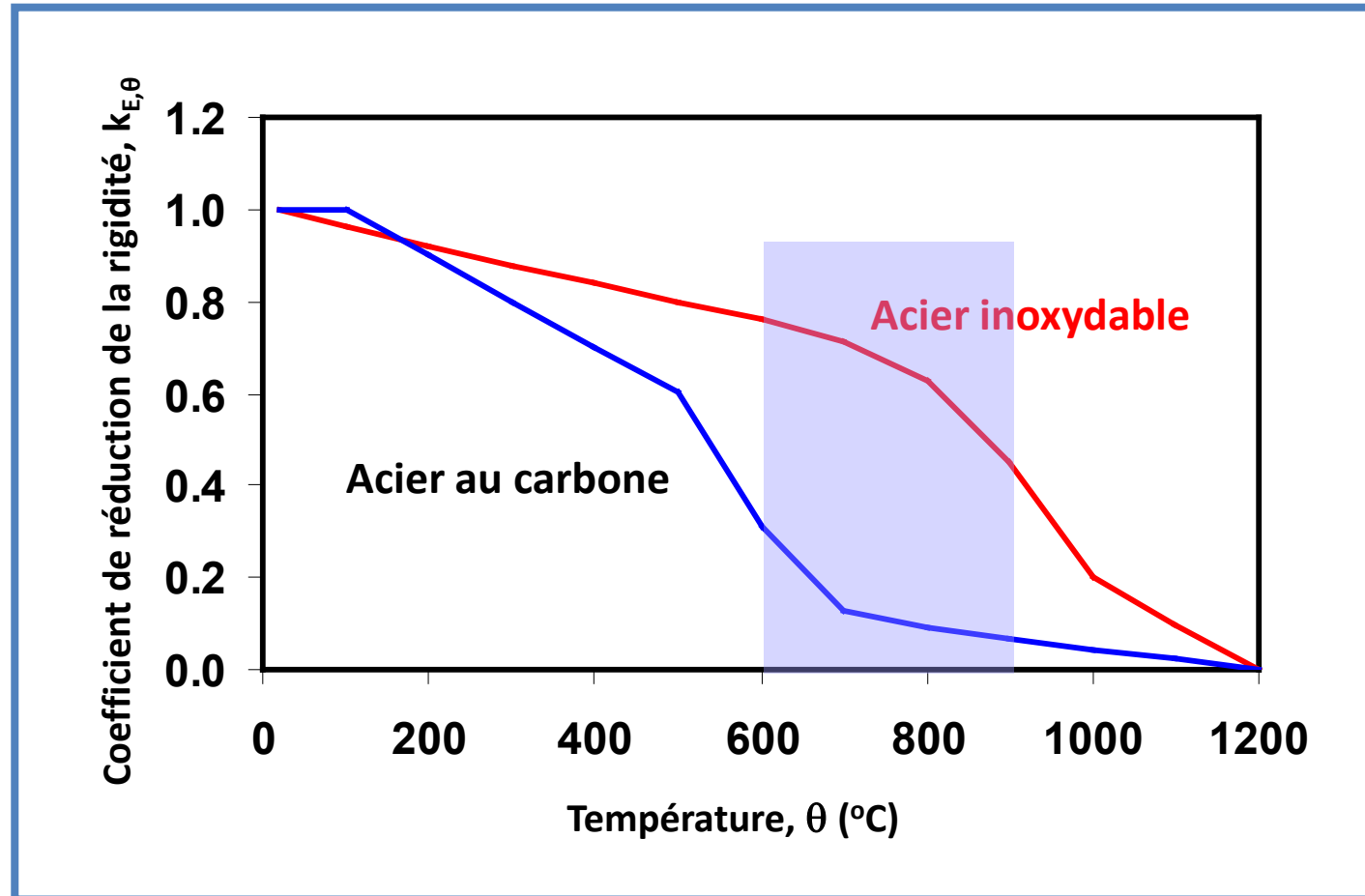
Comportement aux températures élevées



$k_{0,2p,\theta}$ = coefficient de réduction de la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 %

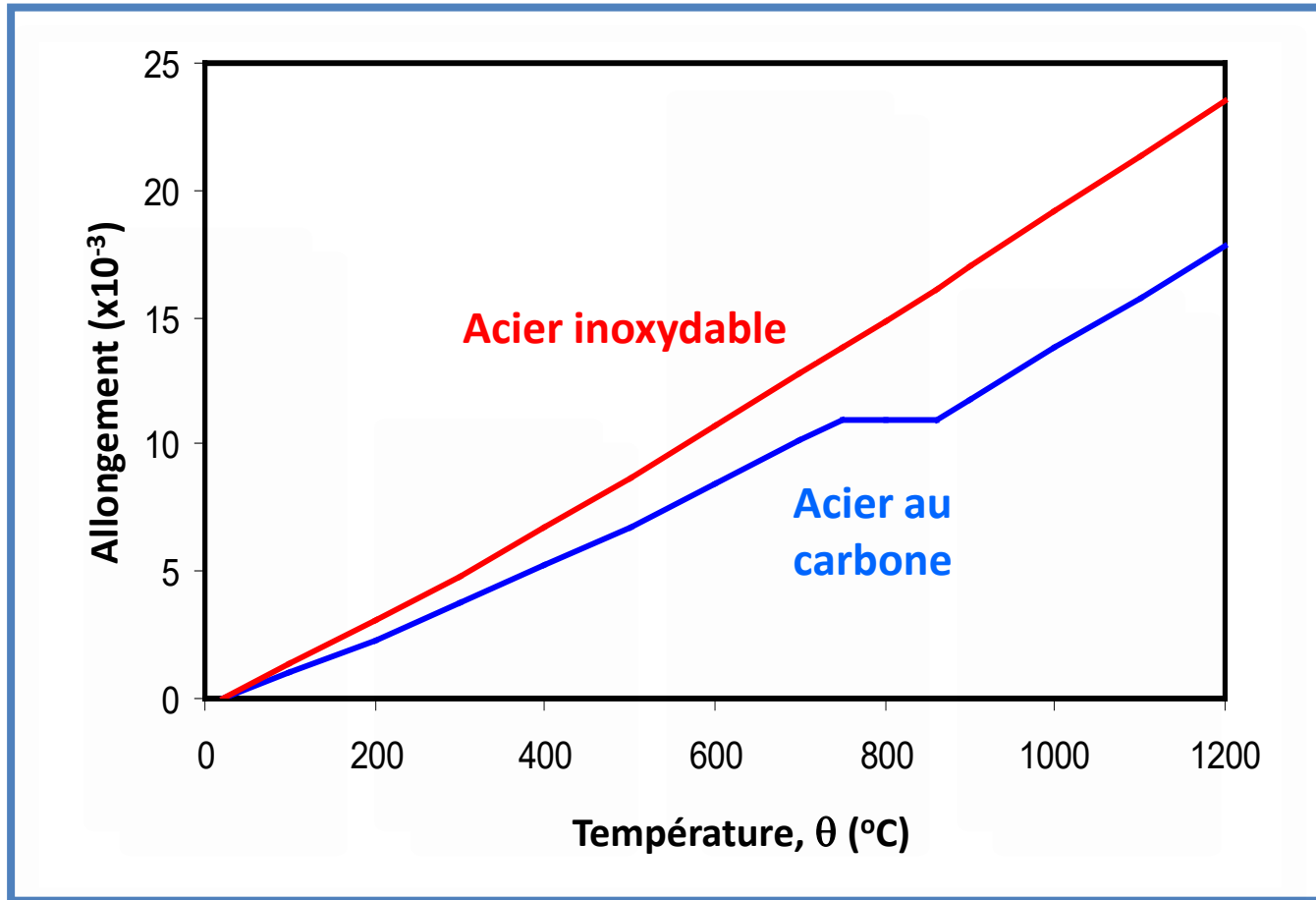
$k_{2,\theta}$ = coefficient de réduction pour une déformation totale de 2 %

Comportement aux températures élevées



Coefficients de réduction de la rigidité

Comportement aux températures élevées



Dilatation thermique

Partie 3

Calculs selon l'Eurocode 3



Calculs d'éléments en acier inoxydable

- Les approches sont les mêmes que pour l'acier au carbone
- Pour les barres tendues et les poutres empêchées de déverser, les règles utilisées sont les mêmes que pour l'acier au carbone
- Quelques différences existent dans les limites de classification des sections, le voilement local et les courbes de flambement en raison :
 - de la non-linéarité de la courbe contrainte-déformation
 - des caractéristiques d'écrouissage
 - des niveaux de contraintes résiduelles différents



Normes de calcul internationales

Quelles sont les normes de calcul disponibles pour les structures en acier inoxydable ?



Yacht Club d'Hamilton Island, Australie

EN 1990

Sécurité des structures, aptitude au service et durabilité

EN 1991

Action sur les structures

EN 1992

EN 1993

EN 1994

EN 1995

EN 1996

EN 1999

Calculs et dimensionnements

EN 1997

Calculs géotechniques

EN 1998

Calculs sismiques

Les Eurocodes
représentent
une suite
cohérente de
normes de
calculs des
structures.
Ils couvrent
tous les
matériaux de
construction
courants

Liens entre les Eurocodes

Eurocode 3 : Partie 1 (EN 1993-1)

EN 1993-1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments

EN 1993-1-2 : Calcul du comportement au feu

EN 1993-1-3 : Profilés et plaques formés à froid

EN 1993-1-4 : Aciers inoxydables

EN 1993-1-5 : Plaques planes

EN 1993-1-6 : Résistance et stabilité des structures en coque

EN 1993-1-7 : Structures en plaques chargées hors de leur plan

EN 1993-1-8 : Calcul des assemblages

EN 1993-1-9 : Fatigue

EN 1993-1-10 : Choix des qualités d'acier

EN 1993-1-11 : Calcul des structures à câbles ou éléments tendus

EN 1993-1-12 : Règles additionnelles pour l'utilisation de l'EN 1993 jusqu'à la nuance d'acier S 700

Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

Partie 1.4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables

FA114142 ISSN 0335-3931
norme européenne **NF EN 1993-1-4**
norme française **Février 2007**
Indice de classement : P 22-314
ICS : 91.080.10

Eurocode 3
Calcul des structures en acier

**Partie 1-4 : Règles générales —
Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables**

E : Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 1-4: General rules —
Supplementary rules for stainless steels
D : Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten —
Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln
zur Anwendung von nichtrostenden Stählen

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 20 janvier 2007 pour prendre effet le 20 février 2007.

Est destinée à remplacer partiellement la norme expérimentale XP ENV 1993-1-4, d'août 2000, qui reste en vigueur jusqu'en mars 2010.

Correspondance La Norme européenne EN 1993-1-4:2006 a le statut d'une norme française.

Analyse La présente partie de l'Eurocode 3 fixe des dispositions complémentaires pour le calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil qui étendent et modifient l'application des EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-5 et EN 1993-1-8 aux aciers inoxydables austénitiques, austéno-ferritiques. Le présent document ne comprend pas de document d'application national mais doit être complété par une Annexe nationale qui définit les modalités de son application.

Descripteurs Thésaurus International Technique : bâtiment, génie civil, construction métallique, acier de construction, acier inoxydable, calcul, règle de calcul, conception, règle de construction, résistance des matériaux.

Modifications Par rapport au document destiné à être remplacé, adoption de la norme européenne.

Corrections

Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) — 11, rue Francis de Pressensé — 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tel. : + 33 (0)1 41 62 80 00 — Fax : + 33 (0)1 49 17 90 00 — www.afnor.org

© AFNOR 2007

AFNOR 2007

1^{er} tirage 2007-02-F

Calcul des structures en acier. Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables (2007)

- Modifie et complète les règles données dans d'autres parties de l'Eurocode 3 pour l'acier au carbone lorsque nécessaire
- S'applique aux bâtiment, aux ponts, aux réservoirs, etc.



Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

Partie 1.4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables

Types de barres

- Laminées à chaud et soudées
- Formées à froid
- Barres

Nombre de nuances

	EC3-1-4	Future version
Ferritique	3	3
Austénitique	16	16
Duplex	2	6

Domaines d'application

- Barres et assemblages
- Feu (*en référence à l'EN 1993-1-2*)
- Fatigue (*en référence à l'EN 1993-1-9*)

Autres normes de calcul

- **Japon** – Deux normes : une pour les éléments en acier inoxydable formés à froid et une pour les éléments soudés
- **Afrique du Sud, Australie, Nouvelle Zélande** – Normes pour les éléments en acier inoxydable formés à froid
- **Chine** – Norme en cours de rédaction
- **USA** – Spécifications de l'ASCE pour les éléments formés à froid et Guide de calcul de l'AISC pour les éléments de structure en acier inoxydable laminés à chaud et soudés



Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

Partie 1.4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables

Les prochaines diapos présentent un résumé des règles de calcul issues de l'EN 1993-1-4 pour l'acier inoxydable. Elles mettent également en évidence les principales différences qui existent avec les règles équivalentes pour l'acier au carbone.



Poteaux résistant aux explosions pour l'auvent de l'entrée du « Seven World Trade Centre », New York



Expressions pour la classification des sections et le voilement local selon l'EN 1993-1-4

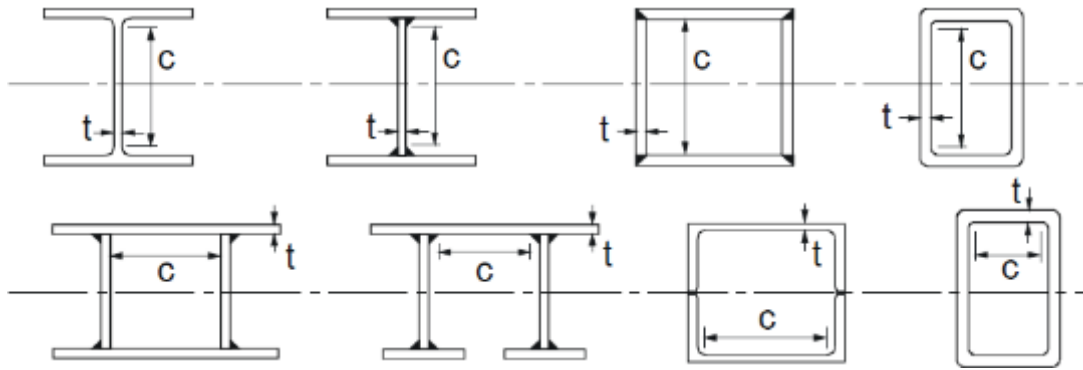
- Limites des rapports largeur-épaisseur plus basses que pour l'acier au carbone
- Expressions légèrement différentes pour le calcul des largeurs efficaces des parois comprimées

Cependant...

La prochaine version de l'EN 1993-1-4 contiendra des expressions moins conservatives pour les limites de classification et pour les largeurs efficaces.

Classification des sections & expressions pour le voilement selon l'EN 1993-1-4

■ Parois comprimées internes

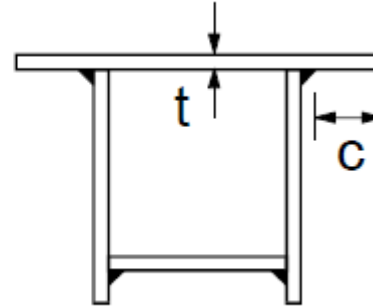
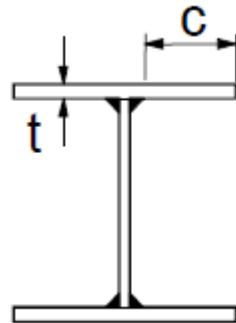
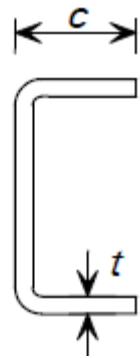


$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000}}$$

Classe	EC3-1-1 : Acier au carbone		EC3-1-4 : Acier inoxydable		EC3-1-4 : Future version	
	Flexion	Compression	Flexion	Compression	Flexion	Compression
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	$c/t \leq 56\varepsilon$	$c/t \leq 25,7\varepsilon$	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	$c/t \leq 58,2\varepsilon$	$c/t \leq 26,7\varepsilon$	$c/t \leq 76\varepsilon$	$c/t \leq 35\varepsilon$
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 90\varepsilon$	$c/t \leq 37\varepsilon$

Classification des sections & expressions pour le voilement selon l'EN 1993-1-4

- Parois comprimées en console



$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000}}$$

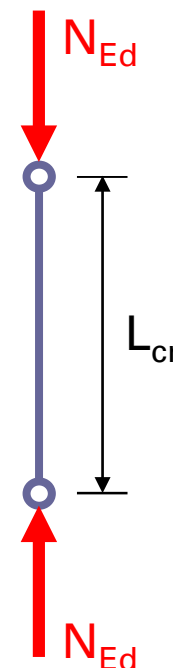
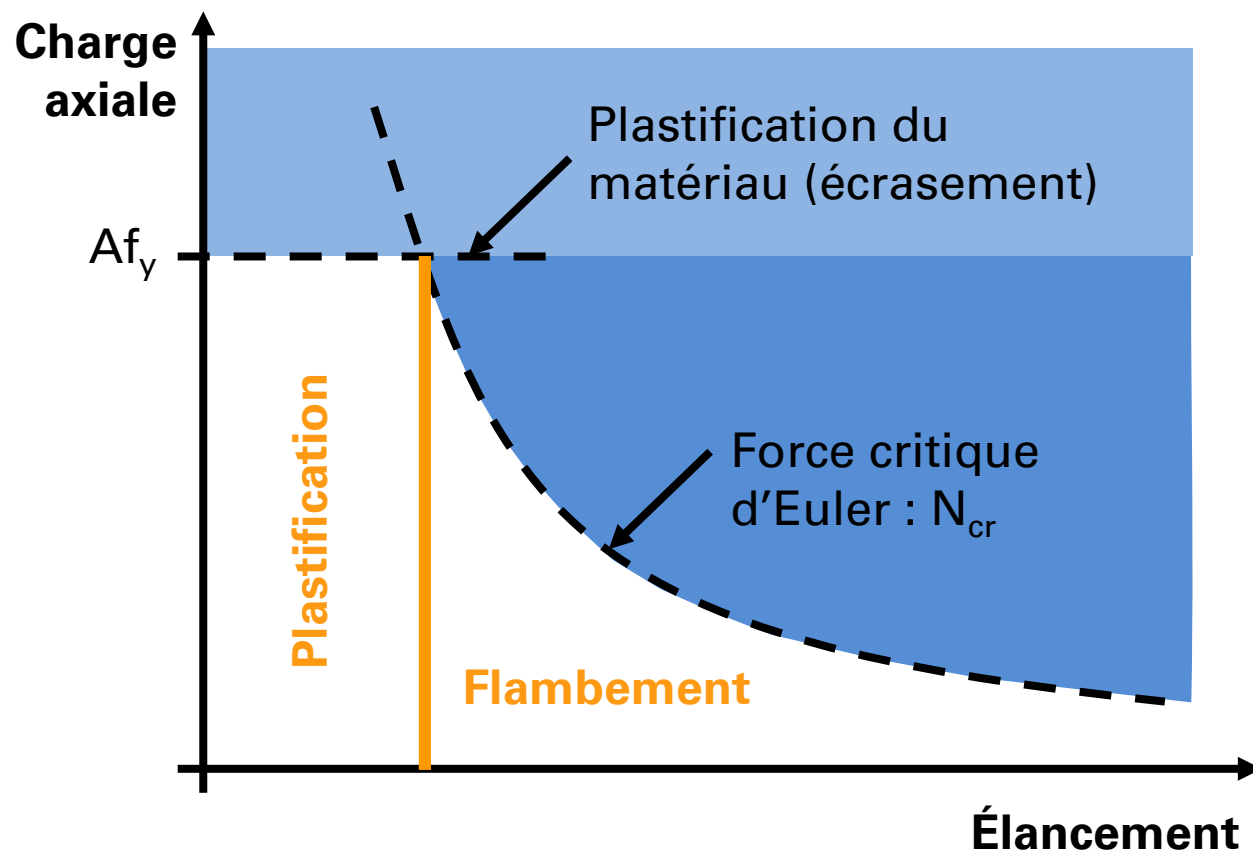
	EC3-1-1 : Acier au carbone	EC3-1-4 : Acier inoxydable		EC3-1-4 : Future version
Classe	Compression	Compression Soudé	Compression Formé à froid	Compression
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9,4\varepsilon$	$c/t \leq 10,4\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 11\varepsilon$	$c/t \leq 11,9\varepsilon$	$c/t \leq 14\varepsilon$

Calcul de poutres et de poteaux

- En général, l'approche est la même que pour l'acier au carbone
- Mais les courbes de flambement sont différentes, pour le flambement et pour le déversement
- et il faut s'assurer d'utiliser la valeur correcte de f_y selon la nuance d'acier (les valeurs minimales spécifiées sont données dans l'EN 10088-4 et -5)

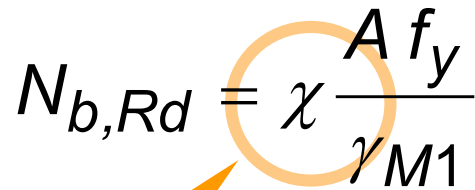
Flambement d'un poteau « parfait »

2 limites : plastification et flambement :



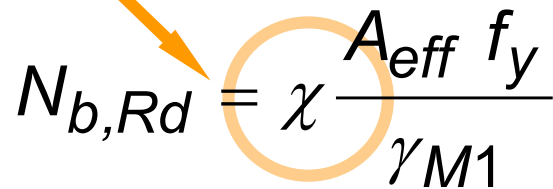
Flambement d'un poteau

Résistance au flambement $N_{b,Rd}$:

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A f_y}{\gamma_{M1}}$$


Pour les Classes 1, 2 et 3

Coefficient de réduction

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$$


Pour les Classes 4 (symétriques)

Flambement d'un poteau

Élancement réduit $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{Pour les sections transversales de Classes 1, 2 et 3}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad \text{Pour les sections transversales de Classe 4}$$

N_{cr} est la force critique de flambement élastique pour le mode de flambement approprié basé sur les propriétés de la section transversale brute

Flambement d'un poteau

Coefficient de réduction χ :

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{mais} \quad \chi \leq 1,0$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

Facteur d'imperfection

Longueur du plateau

Flambement d'un poteau

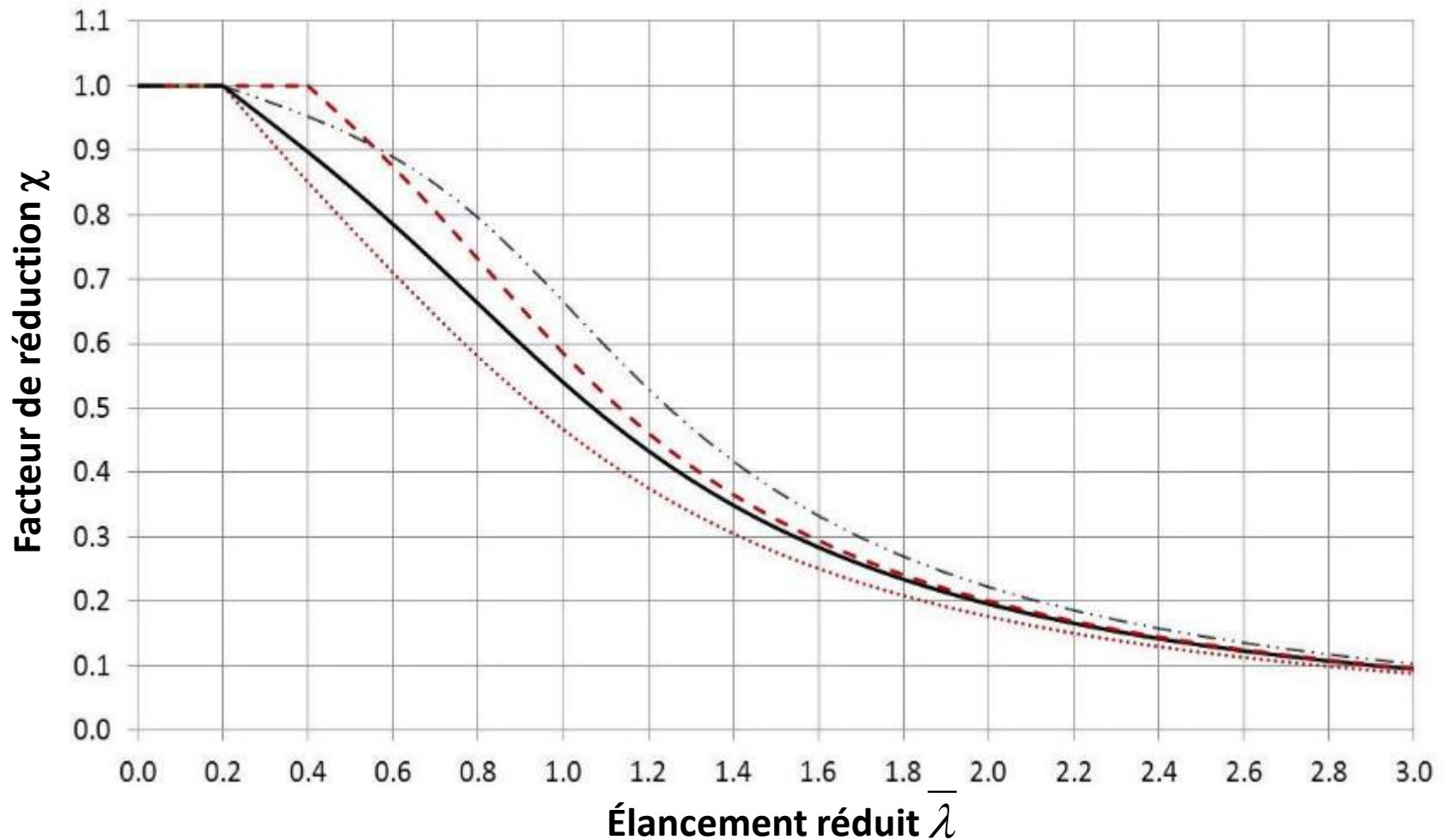
- Le choix de la courbe de flambement dépend de la section transversale, du mode de fabrication et de l'axe de flambement

Tableau 5.3 — Valeurs de α et $\bar{\lambda}_0$ pour le flambement par flexion, torsion et flexion-torsion

Mode de flambement	Type d'élément	α	$\bar{\lambda}_0$
Flexion	Profils ouverts formés à froid	0,49	0,40
	Profils creux (soudés et non soudés)	0,49	0,40
	Profils ouverts soudés (axe principal)	0,49	0,20
	Profils ouverts soudés (axe secondaire)	0,76	0,20
Torsion et flexion-torsion	Tous les éléments	0,34	0,20

Extrait de l'EN 1993-1-4

Courbes de flambement de l'Eurocode 3

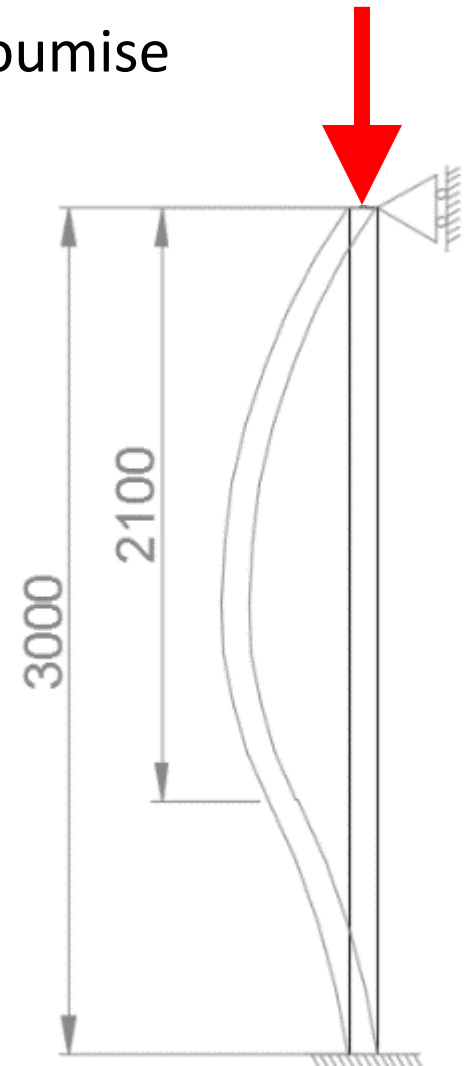
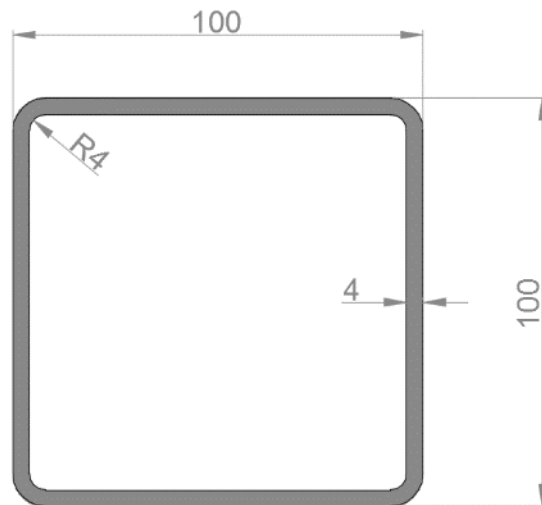


- - - Acier inoxydable : sections creuses (soudées et non soudées), U formés à froid
- Acier inoxydable : sections en I soudées
- Acier au carbone : sections en I soudées, sections creuses formées à froid, U formés à froid
- · - Acier au carbone : sections creuses finies à chaud

Exemple de flambement par flexion au sens de l'Eurocode 3

- Section creuse rectangulaire formée à froid soumise à une compression centrée

	Acier au carbone	Acier inoxydable austénitique
Matériau	S235	EN 1.4301
f_y [MPa]	235	230
E [MPa]	210 000	200 000



Exemple de flambement par flexion au sens de l'Eurocode 3

EC 3-1-1 : S235

Classification

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$$

Toutes les parois internes

$$c/t = 21 < 33 = 33\varepsilon$$

Classe 1

Section transversale : Classe 1

EC 3-1-4 : Austénitique

Classification

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000}} = 0,99$$

Toutes les parois internes

$$c/t = 21 < 25,35 = 25,7\varepsilon$$

Classe 1

Section transversale : Classe 1

Exemple de flambement par flexion au sens de l'Eurocode 3

	EC 3-1-1 : S355	EC 3-1-4 : Duplex
A [mm ²]	1495	1495
f _y [MPa]	235	230
γ _{M0} [-]	1	1,1
N _{c,Rd} [kN]	351	313
L _{cr} [mm]	2100	2100
λ ₁ [-]	93,9	92,6
$\bar{\lambda}$ [-]	0,575	0,583
α [-]	0,49	0,49
$\bar{\lambda}_0$ [-]	0,2	0,4
φ [-]	0,76	0,71
χ [-]	0,80	0,89
γ _{M1} [-]	1	1,1
N _{b,Rd} [kN]	281	277

Exemple de flambement par flexion au sens de l'Eurocode 3

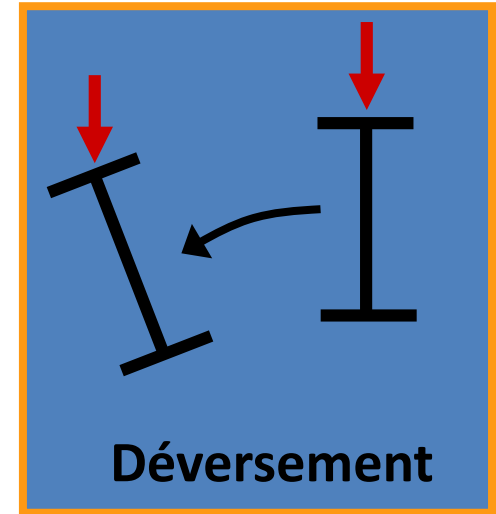
■ Comparaison

	EC 3-1-1 : S235	EC 3-1-4 : Austénitique
f_y [MPa]	235	230
γ_{M0}	1,0	1,1
γ_{M1}	1,0	1,1
Résistance en section $M_{c,Rd}$	351	313
Résistance au déversement $M_{b,Rd}$	281	277

- Dans cet exemple, les aciers au carbone et les aciers inoxydables possèdent des résistances au flambement par flexion très proches

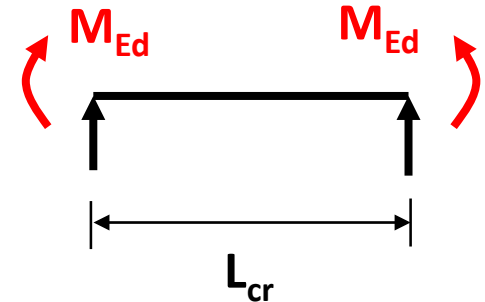
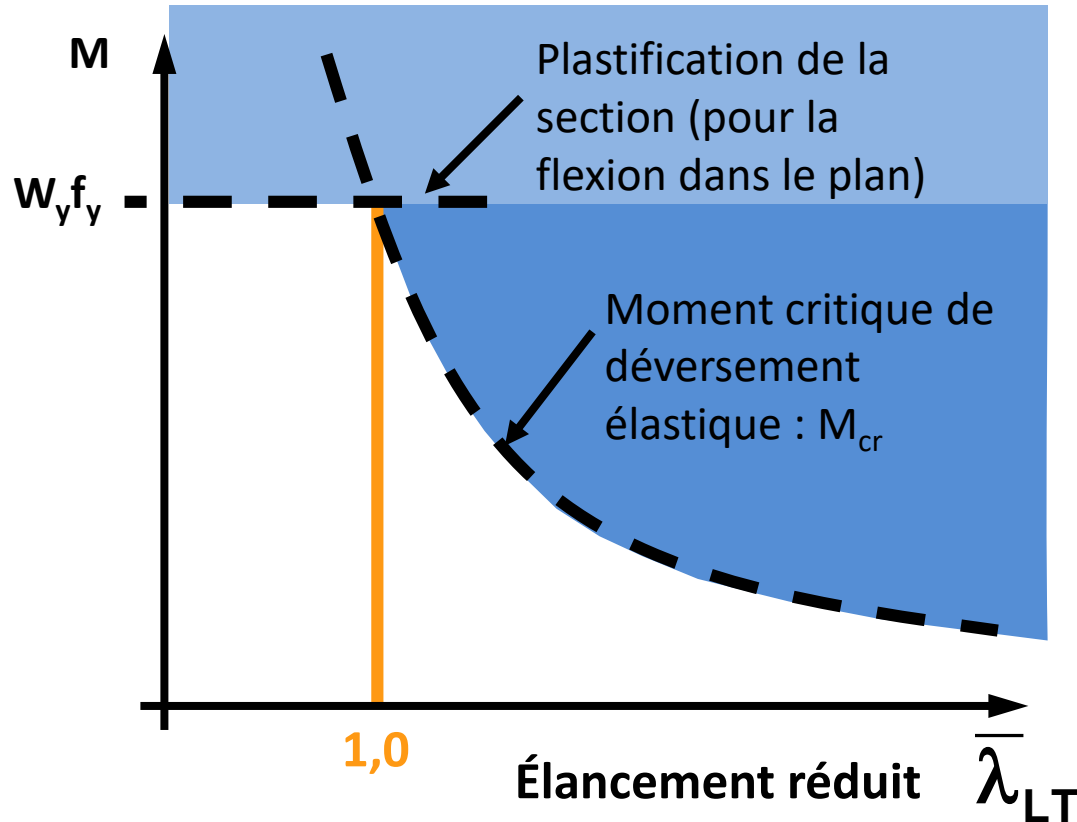
Déversement

- Il peut être évité :
 - si la flexion s'exerce autour de l'axe faible
 - En utilisant des sections creuses (rectangulaires, circulaires ou carrées) ou encore des barres rondes ou carrées
 - si la poutre est maintenue au déversement
 - ou si : $\bar{\lambda}_{LT} < 0,4$



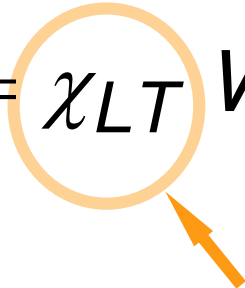
Déversement

- L'approche pour le calcul des poutres au déversement est analogue à celui des poteaux vis-à-vis du flambement.



Déversement

- Le moment de résistance au déversement $M_{b,Rd}$ d'une poutre (ou d'un tronçon de poutre) non maintenue latéralement doit être pris égal à :

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$


Facteur de réduction pour le déversement

Déversement

- Les expressions de calcul des courbes de déversement sont les suivantes :

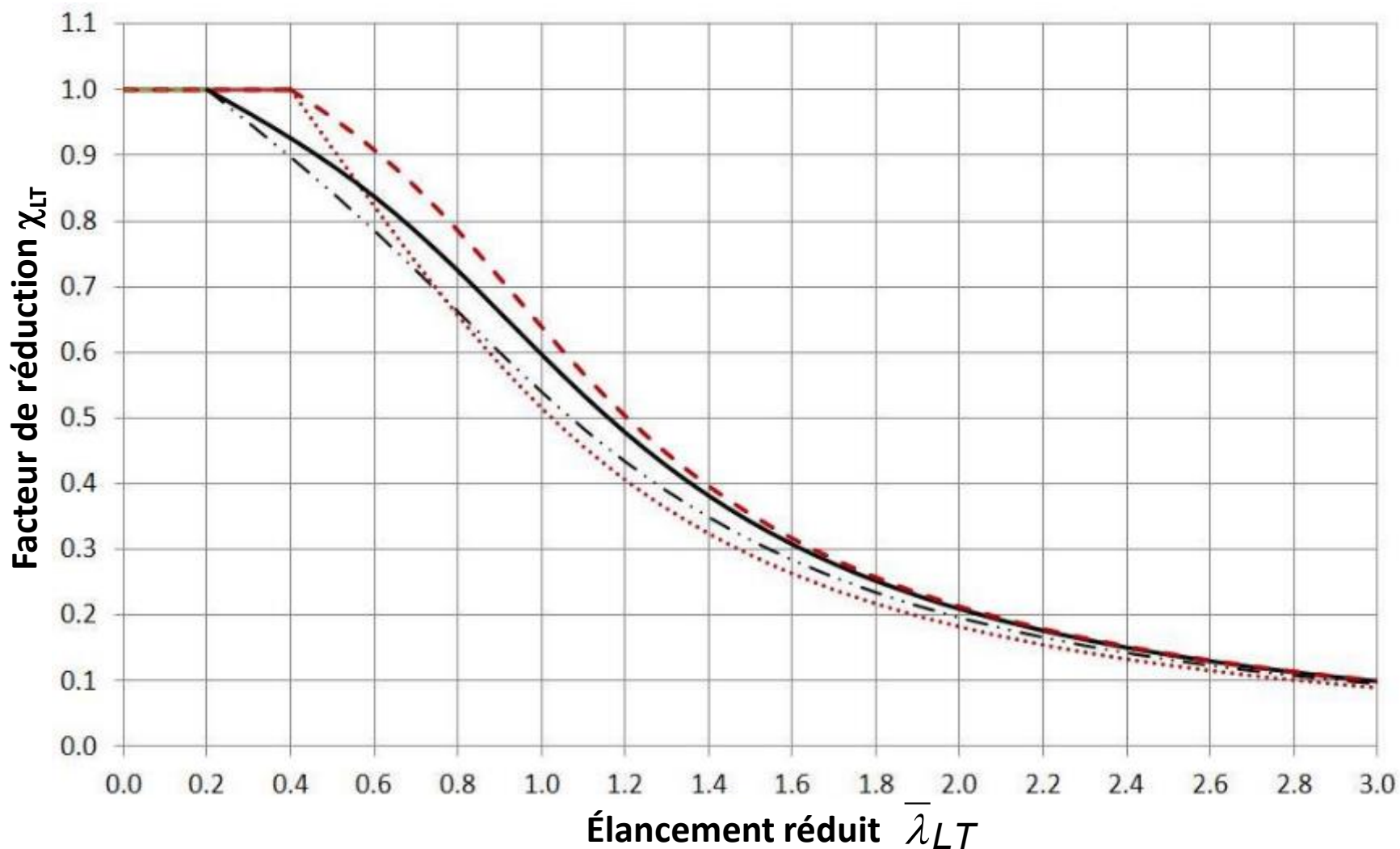
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{mais} \quad \chi_{LT} \leq 1,0$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Facteur d'imperfection

Longueur du plateau

Eurocode 3 : courbes de déversement



— · — Acier au carbone : sections en I soudées
— Acier au carbone : U formés à froid

· · · Acier inoxydable : sections en I soudées
- - - Acier inoxydable : U formés à froid

Élancement réduit

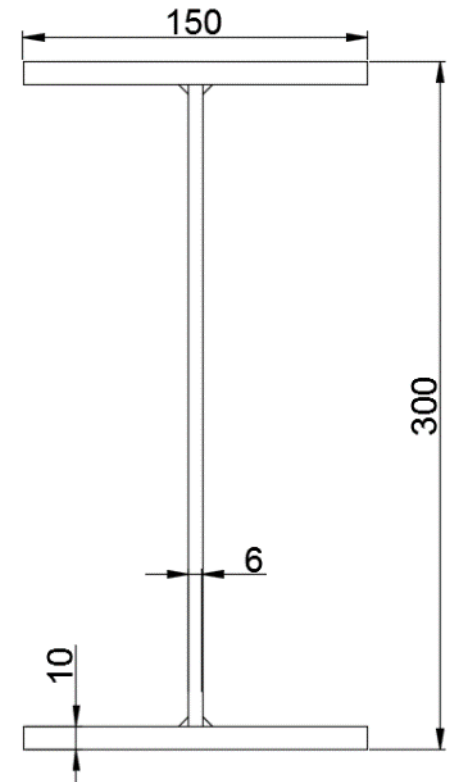
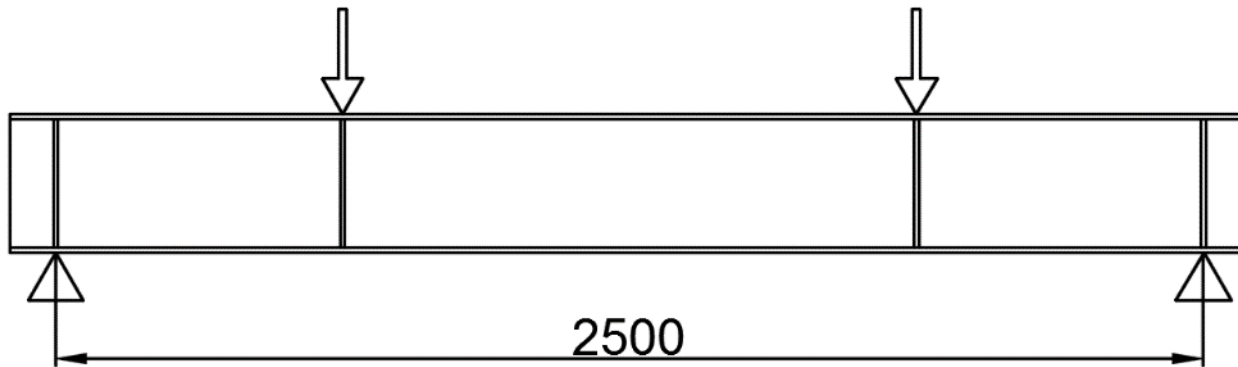
- Élancement réduit pour le déversement :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

- Les courbes de déversement sont les mêmes que pour la compression (sans la courbe a_0)
- W_y dépend de la classification de la section
- M_{cr} est le moment critique de déversement élastique

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

- Poutre en I fléchi



	Acier au carbone	Acier inoxydable Duplex
Matériau	S355	EN 1.4162
f_y [MPa]	355	450
E [MPa]	210000	200000

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

EC 3-1-1 : S355

Classification

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,81$$

Semelle

$$c/t = 6,78 < 7,3 = 9\varepsilon$$

Classe 1

Ame

$$c/t = 45,3 < 58,3 = 72\varepsilon$$

Classe 1

Section transversale : Classe 1

EC 3-1-4 : Duplex

Classification

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000}} = 0,71$$

Semelle

$$c/t = 6,78 < 7,76 = 11\varepsilon$$

Classe 1

Ame

$$c/t = 45,3 < 58,3 = 72\varepsilon$$

Classe 3

Section transversale : Classe 3

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

EC 3-1-1 : S355

- Moment ultime

- Classe 1

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = 196 \text{ kN.m}$$

EC 3-1-4 : Duplex

- Moment ultime

- Classe 3

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = 202 \text{ kN.m}$$

Future version de l'EC 3-1-4

- Limites de classification: proches de celle de l'acier au carbone

- Section transversale de classe 2

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = 226 \text{ kN.m}$$

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

Moment critique de déversement élastique :

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_T}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\}$$

	EC 3-1-1 : S355	EC 3-1-4 : Duplex
C_1 [-]	1,04	1,04
C_2 [-]	0,42	0,42
k_z [-]	1	1
k_w [-]	1	1
z_g [mm]	160	160
I_z [mm ⁴]	$5,6 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^6$
I_T [mm ⁴]	$1,2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
I_w [mm ⁶]	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$
E [MPa]	210000	200000
G [MPa]	81000	77000
M_{cr} [kNm]	215	205

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

Résistance au déversement :

	EC 3-1-1 : S355	EC 3-1-4 : Duplex	EC 3-1-4 : Future version
W_y [mm ³]	5,5.10⁵	4,9.10⁵	5,5.10⁵
f_y [N/mm ²]	355	450	450
M_{cr} [kNm]	215	205	205
$\bar{\lambda}_{LT}$ [-]	0,96	1,04	1,10
α_{LT} [-]	0,49	0,76	0,76
$\bar{\lambda}_{LT,0}$ [-]	0,2	0,4	0,4
ϕ_{LT} [-]	1,14	1,29	1,37
χ_{LT} [-]	0,57	0,49	0,46
γ_{M1} [-]	1,0	1,1	1,1
$M_{b,Rd}$ [kNm]	111	99	103

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

- Comparaison

	EC 3-1-1 : S355	EC 3-1-4 : Duplex	EC 3-1-4 : Future version
f_y [MPa]	355	450	450
γ_{M0}	1,0	1,1	1,1
γ_{M1}	1,0	1,1	1,1
Résistance en section $M_{c,Rd}$	196	202	226
Résistance au déversement $M_{b,Rd}$	110	98	102

- Dans cet exemple, les aciers au carbone et les aciers inoxydables possèdent une résistance au déversement très proche.
- Toutefois, les essais actuels et la littérature démontrent que ces valeurs devraient être modifiées pour être plus proches de la réalité → Elles sont trop conservatives.

Partie 4

Méthodes alternatives

Méthodes alternatives

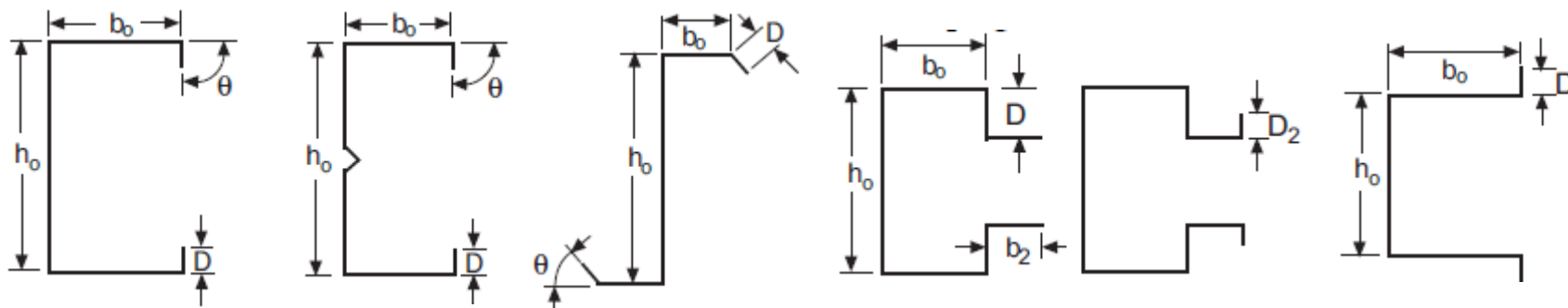
- Méthode de la « résistance directe » (DSM*)
 - Issue de la norme américaine
 - Utilisable pour les profils à parois minces
- Méthode de la « résistance continue » (CSM**)
 - Prend en compte les effets bénéfiques de l'écrouissage
- Méthode des éléments finis

*De l'anglais : « Direct Strength Method »

**De l'anglais « Continuous Strength Method »

Méthode de la « résistance directe »

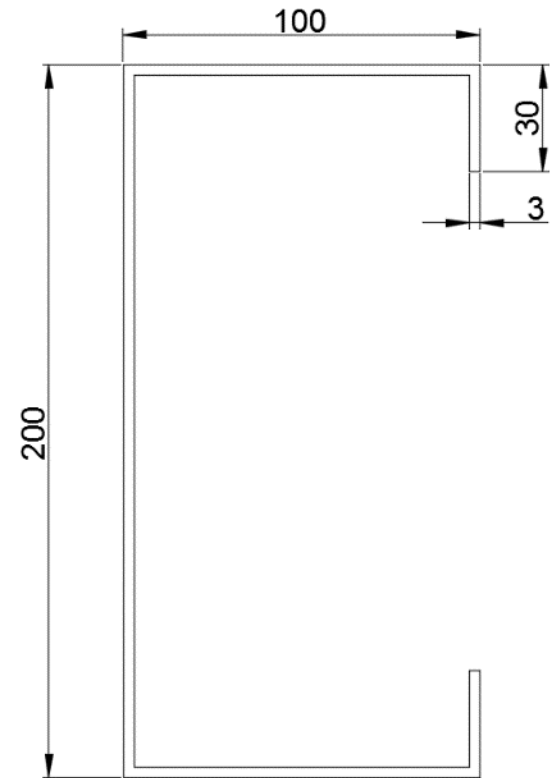
- Annexe 1 de l'AISI
- Méthode très simple et directe
- Utilisée pour les sections à parois minces



- Mais elle exige une « analyse au flambement élastique »
 - Méthode théorique issue de la littérature
 - Méthode des bandes finies (par exemple CUFSM)
- Pour plus d'informations : <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/>

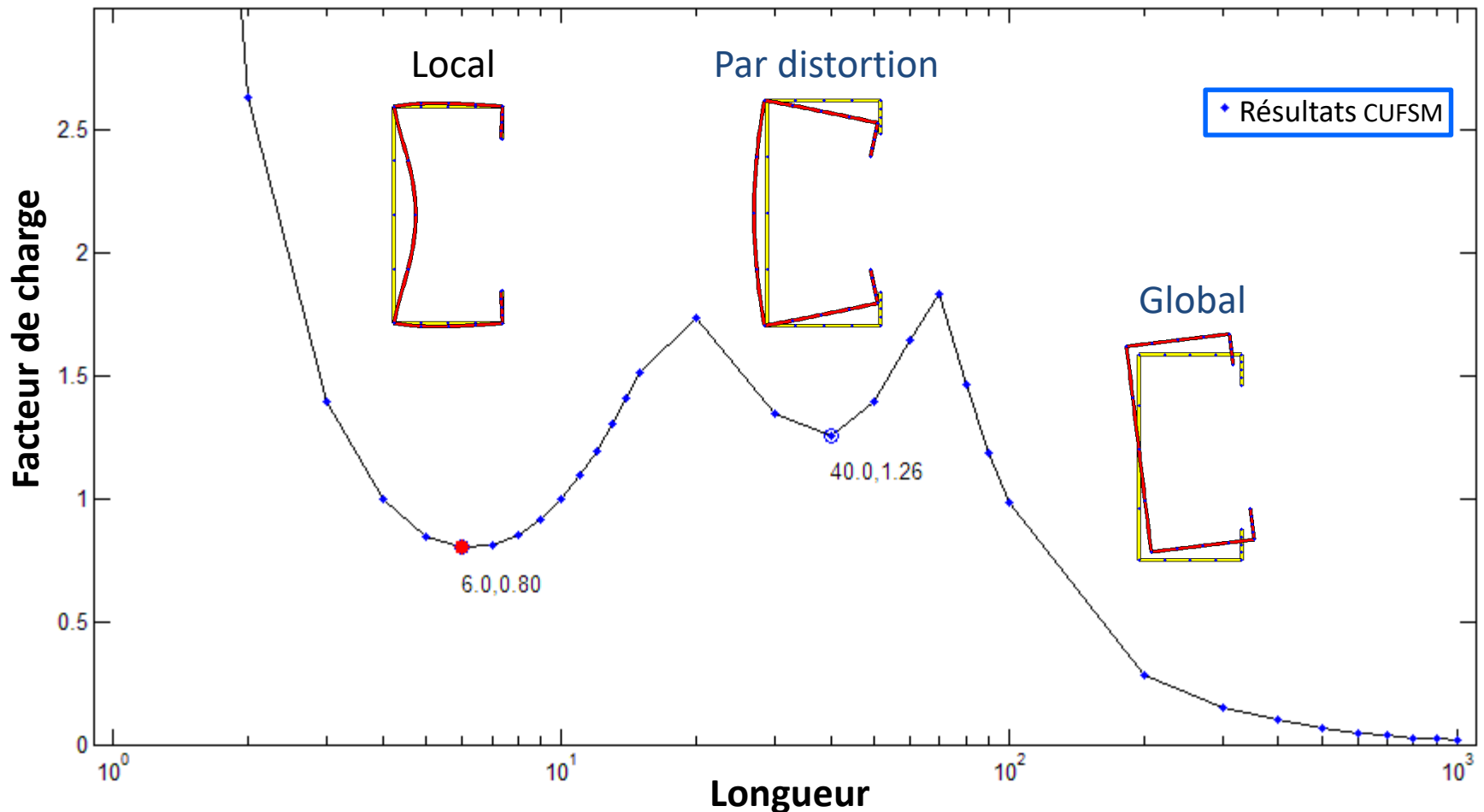
Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- Section en C à bords raidis sous un effort de compression
- Acier inoxydable ferritique
 - Longueur du poteau :
 - EN 1.4003
 - $f_y = 280$ MPa
 - $f_u = 450$ MPa
 - $E = 220$ GPa



Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- Première étape : analyse au flambement élastique



Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- Résultat de l'analyse = Charge de flambement élastique
 - Dans cet exemple, les facteurs de charge pour le flambement élastique sont les suivants :
 - Flambement local : 0,80
 - Flambement par distorsion : 1,26
 - Flambement global : 0,28
- Deuxième étape : Calcul des résistances nominales pour le :
 - Flambement local \Rightarrow une équation
 - Flambement par distorsion \Rightarrow une équation
 - Flambement global \Rightarrow une équation

Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- **Résistance nominale au flambement global P_{ne}**

- $\lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cre}} = 1,88$

- $P_y = A f_y = 376 \text{ kN}$

- $P_{cre} = 0,28 \times 376 = 107 \text{ kN}$

Pour $\lambda_c \leq 1,5$ $P_{ne} = (0,658^{\lambda_c^2}) P_y$

Pour $\lambda_c > 1,5$ $P_{ne} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) P_y$

- $P_{ne} = 93,81 \text{ kN}$

Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- **Résistance nominale au flambement global P_{nl}**

- $\lambda_l = \sqrt{P_{ne}/P_{crl}} = 0,56$

- $P_{crl} = 0,80 \times 376 = 302 \text{ kN}$

Pour $\lambda_l \leq 0,776$ $P_{nl} = P_{ne}$

Pour $\lambda_l > 0,776$ $P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne}$

- $P_{nl} = 93,81 \text{ kN}$

Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- **Résistance nominale au flambement par distorsion P_{nd}**

- $\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} = 0,89$

- $P_{crd} = 1,26 \times 376 = 473 \text{ kN}$

Pour $\lambda_d \leq 0,561$ $P_{nd} = P_y$

Pour $\lambda_d > 0,561$ $P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y$

- $P_{nd} = 344,56 \text{ kN}$

Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- Troisième étape : La résistance axiale P_n est « simplement » le minimum des résistances au flambement nominales
 - Local : $P_{nl} = 93,81$ kN
 - Par distorsion : $P_{nd} = 344,56$ kN
 - Global : $P_{ne} = 93,81$ kN

$$\rightarrow P_n = 93,81 \text{ kN}$$

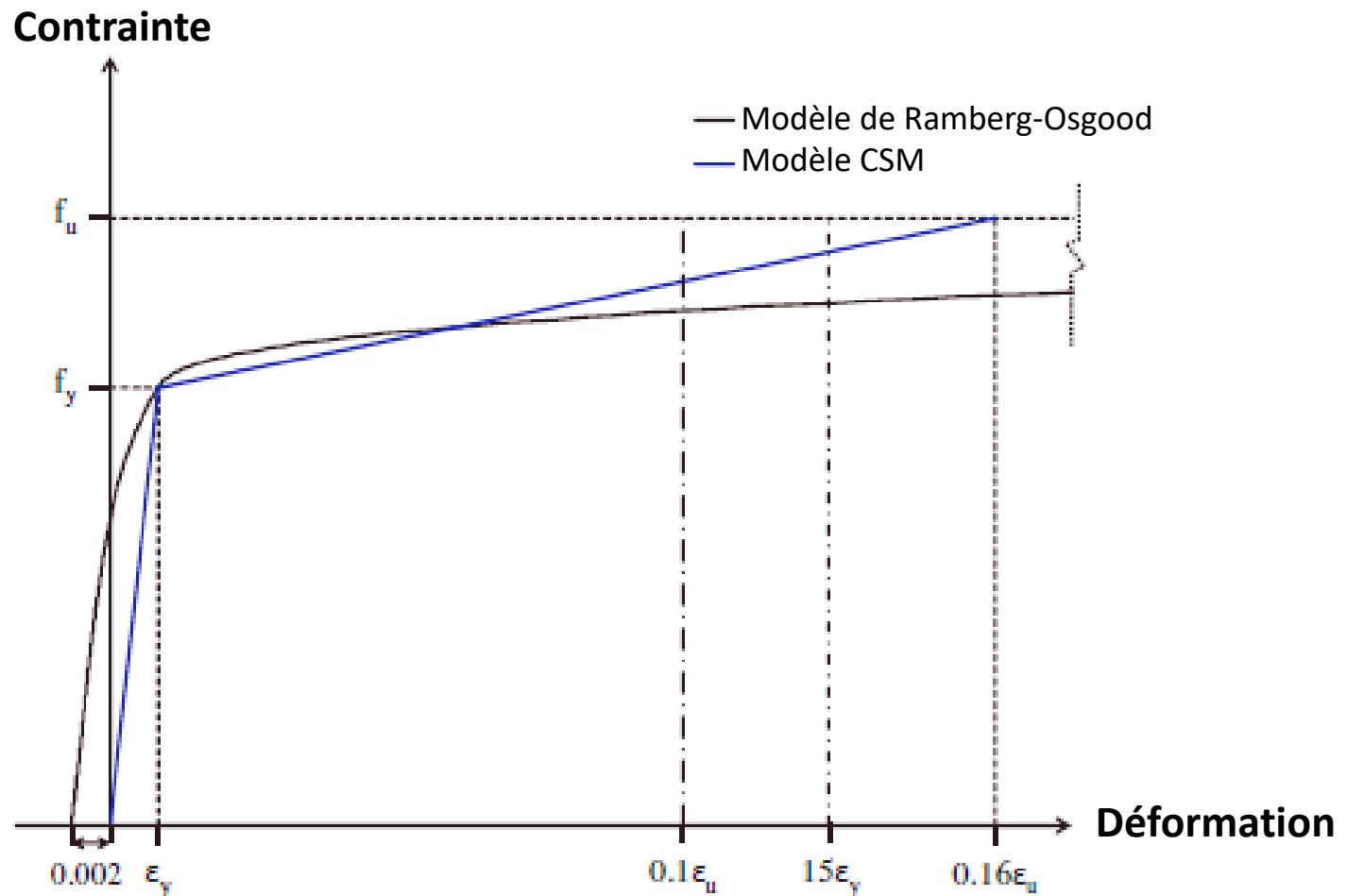
Méthode de la « résistance continue »

- Caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable :
 - Comportement non-linéaire matériel
 - Avec écrouissage
 - Les méthodes de calcul conventionnelles ne sont pas capables de tenir compte du potentiel de plastification complète de la section

La méthode de la « résistance continue » utilise une loi de comportement qui tient compte de l'écrouissage

Méthode de la « résistance continue »

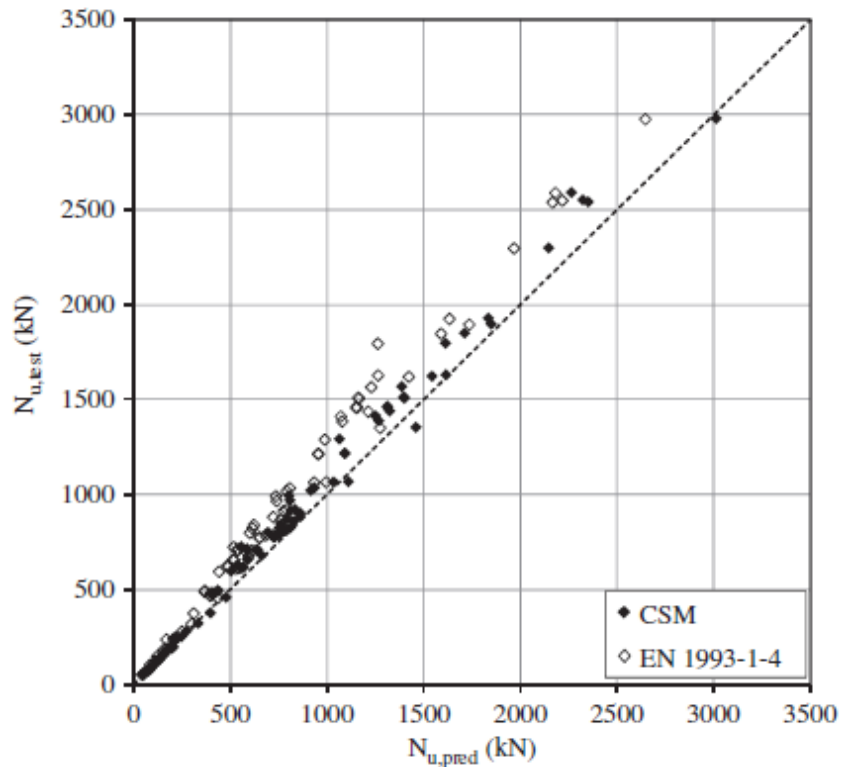
- Loi de comportement considérée dans la CSM :



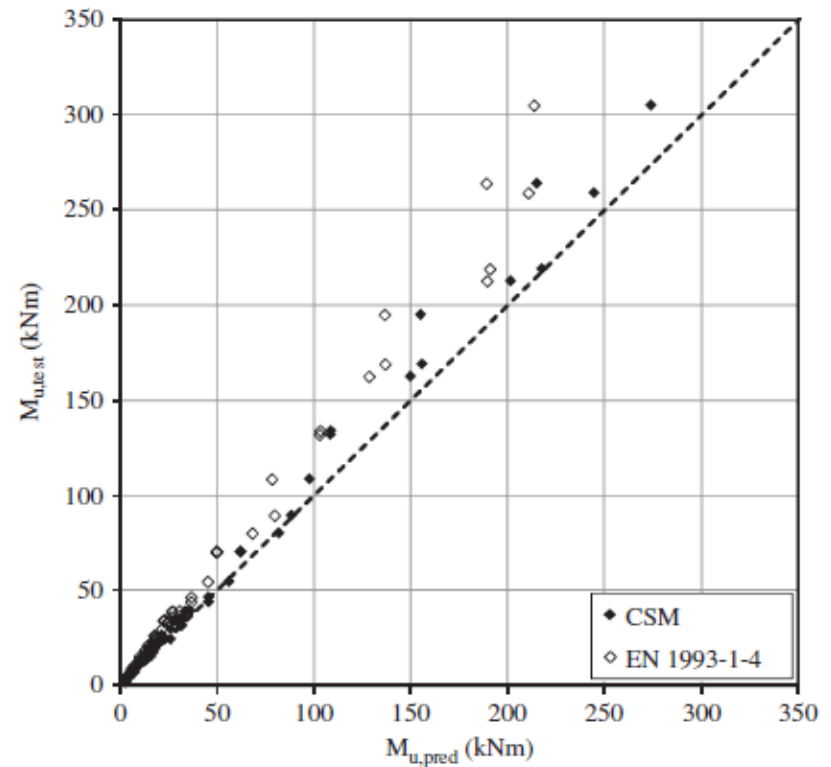
Méthode de la « résistance continue » ou CSM

Comparaison entre les résultats EC3 ou CSM avec des essais :

En compression



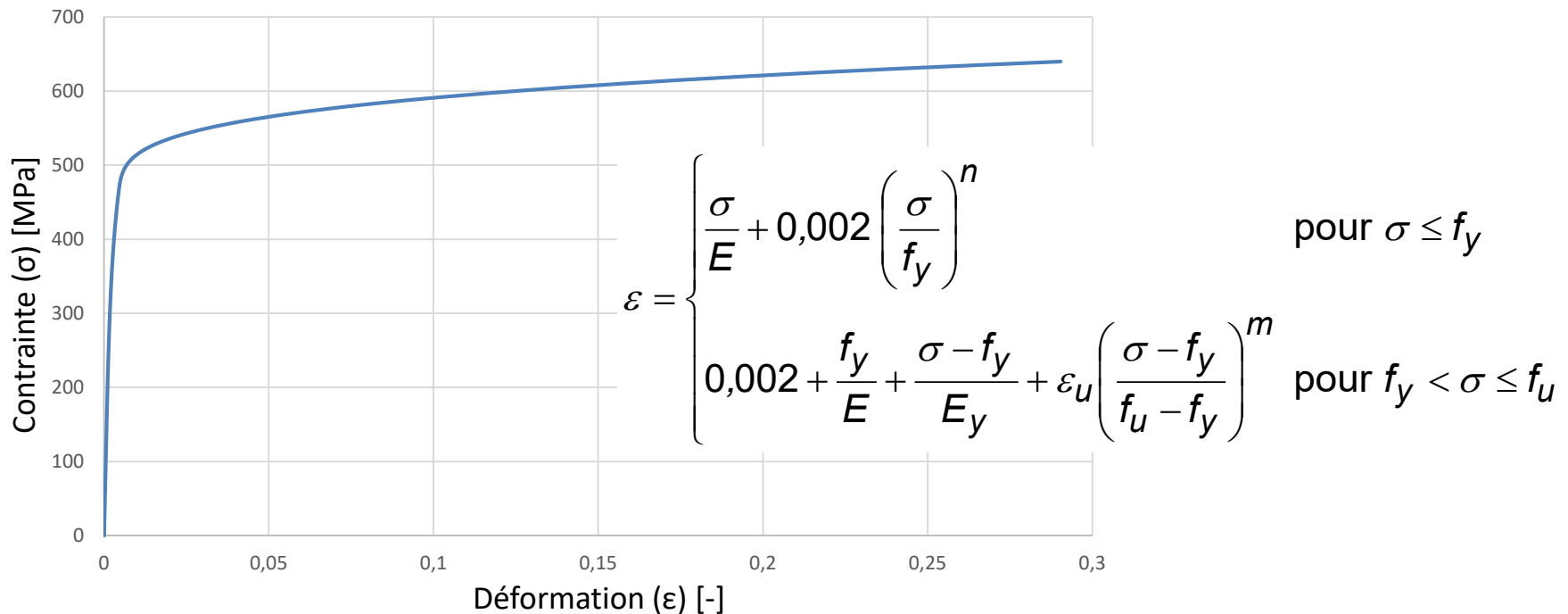
En flexion



La CSM est capable de refléter précisément le comportement des sections transversales

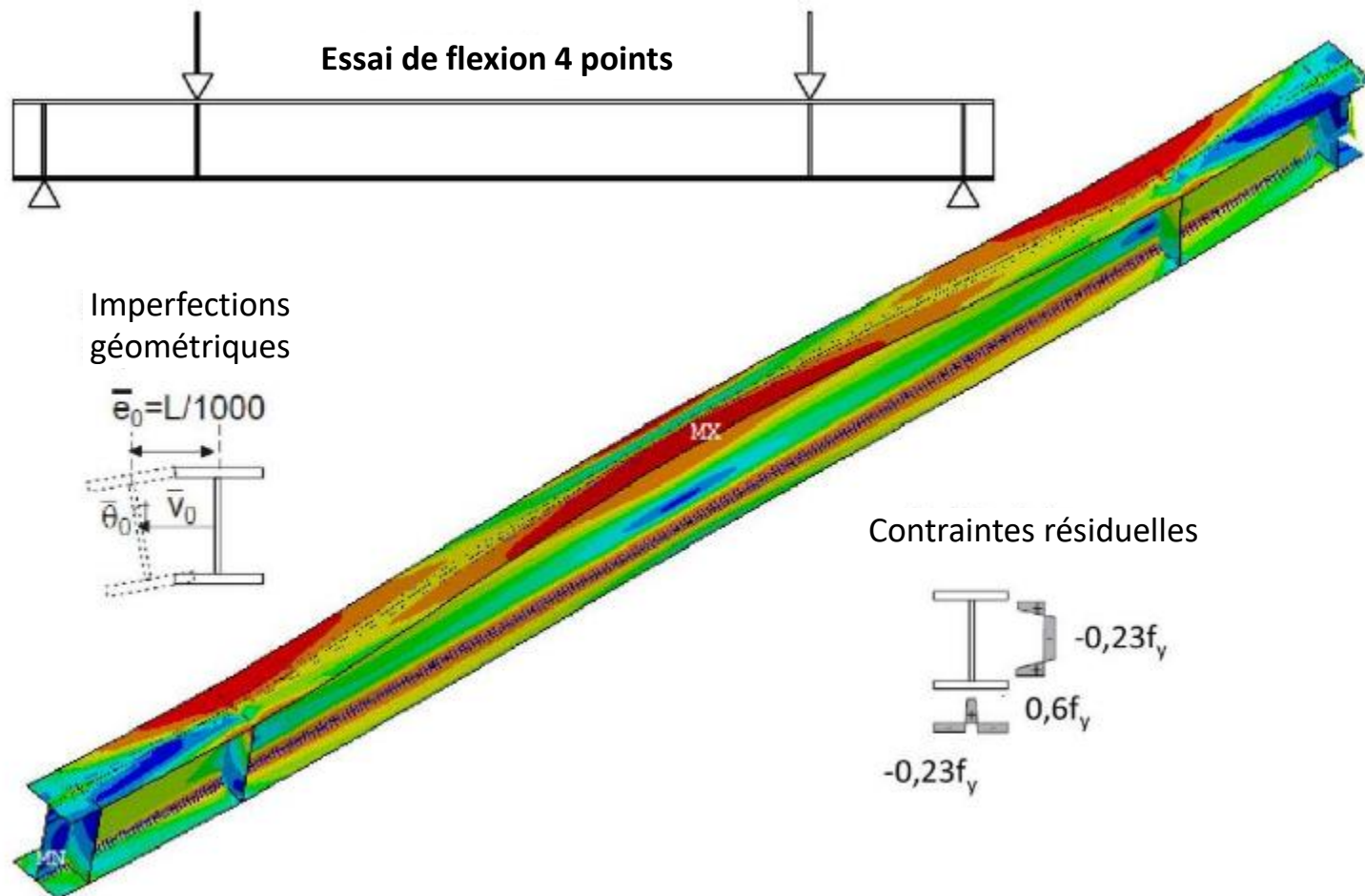
Méthodes des éléments finis

- La courbe contrainte-déformation du matériau peut être modélisée précisément (en utilisant par exemple la loi de Ramberg-Osgood ou des résultats de mesures « réelles » effectuées sur des éprouvettes de traction)



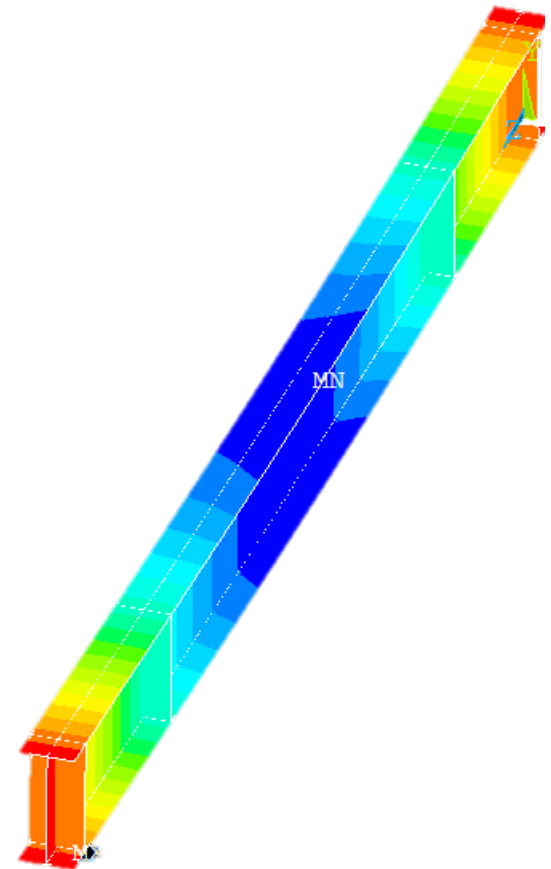
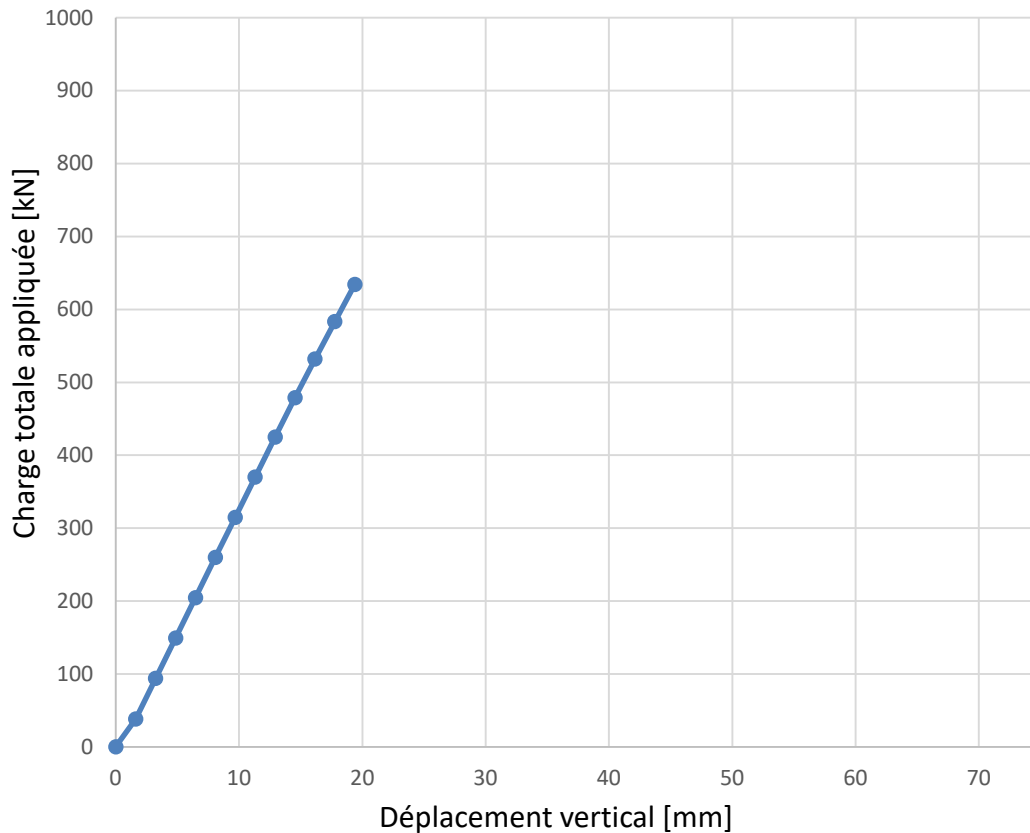
Méthode des éléments finis

- Poutre en I fléchi avec risque de déversement : toutes les imperfections peuvent être modélisées



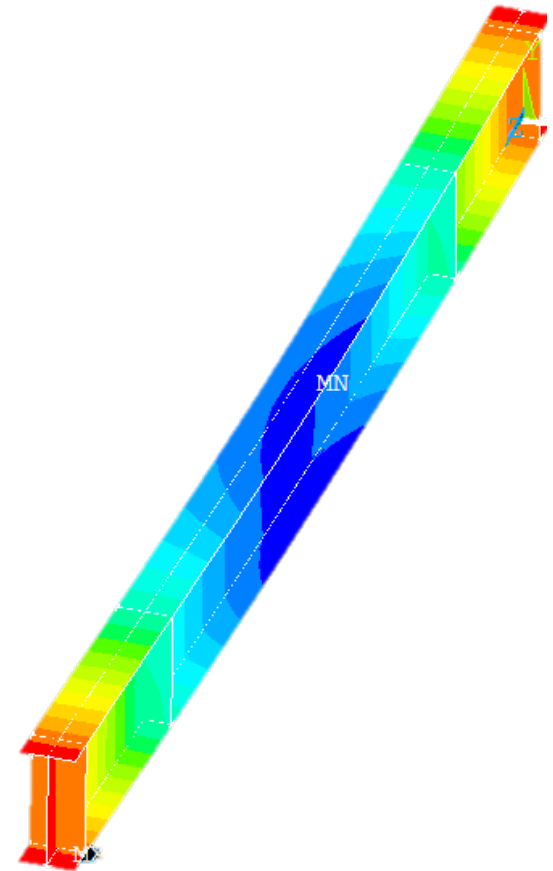
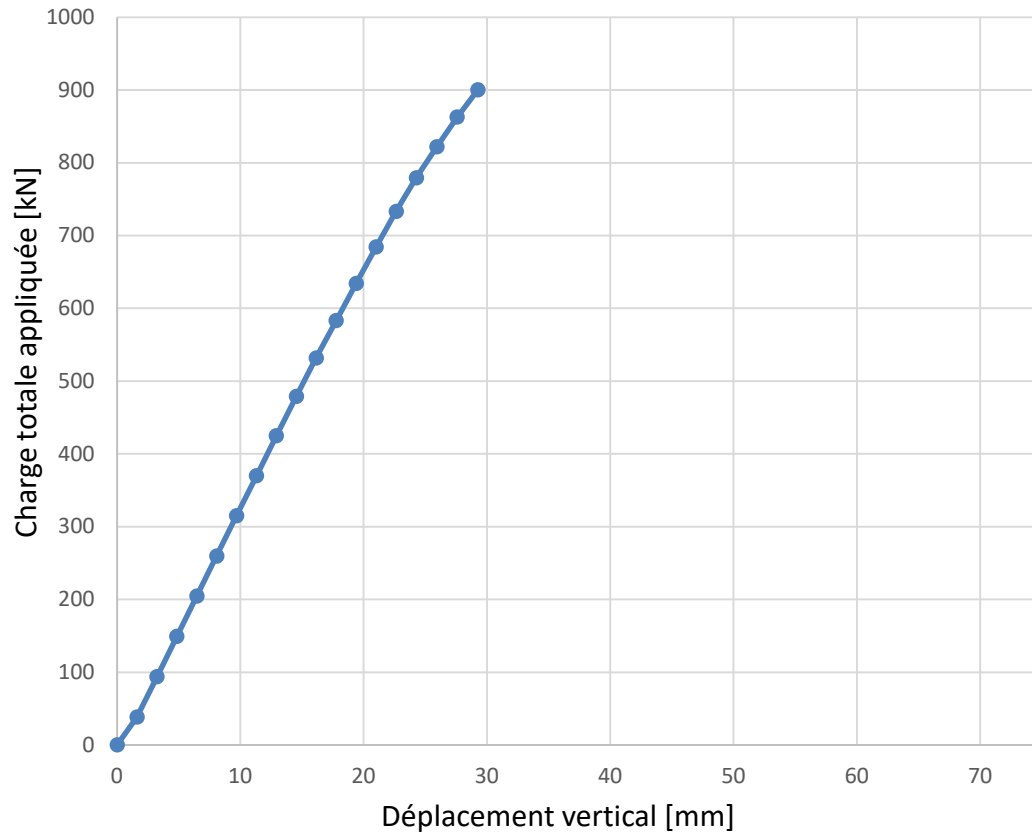
Méthode des éléments finis

- On peut calculer l'évolution de la flèche en fonction de la charge
 - Résultats : comportement élastique et première plastification



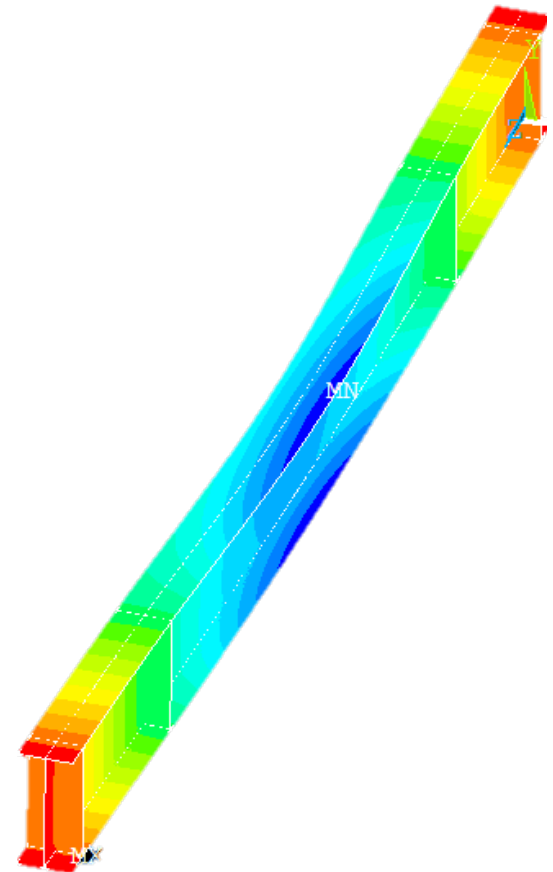
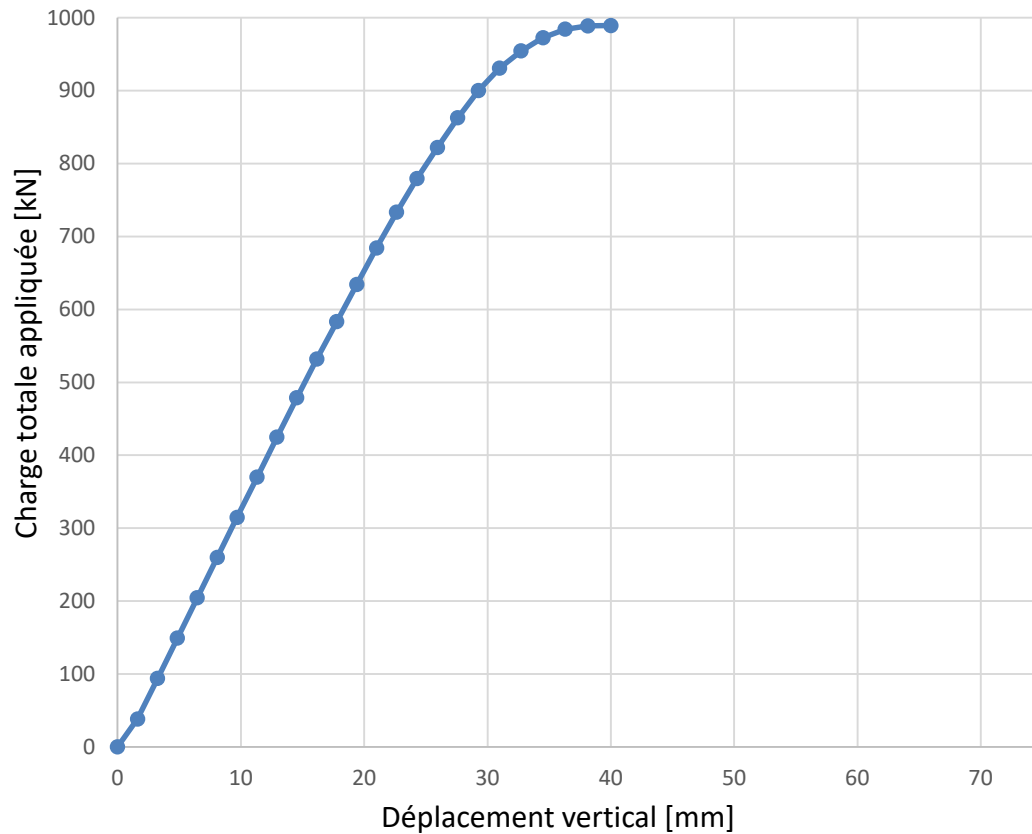
Méthode des éléments finis

- Résultats : phénomène d'instabilité → Début du déversement



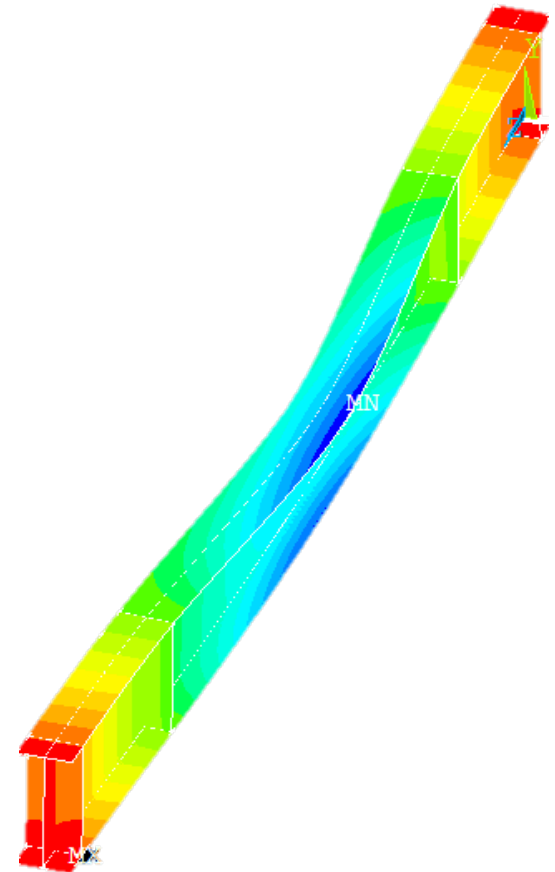
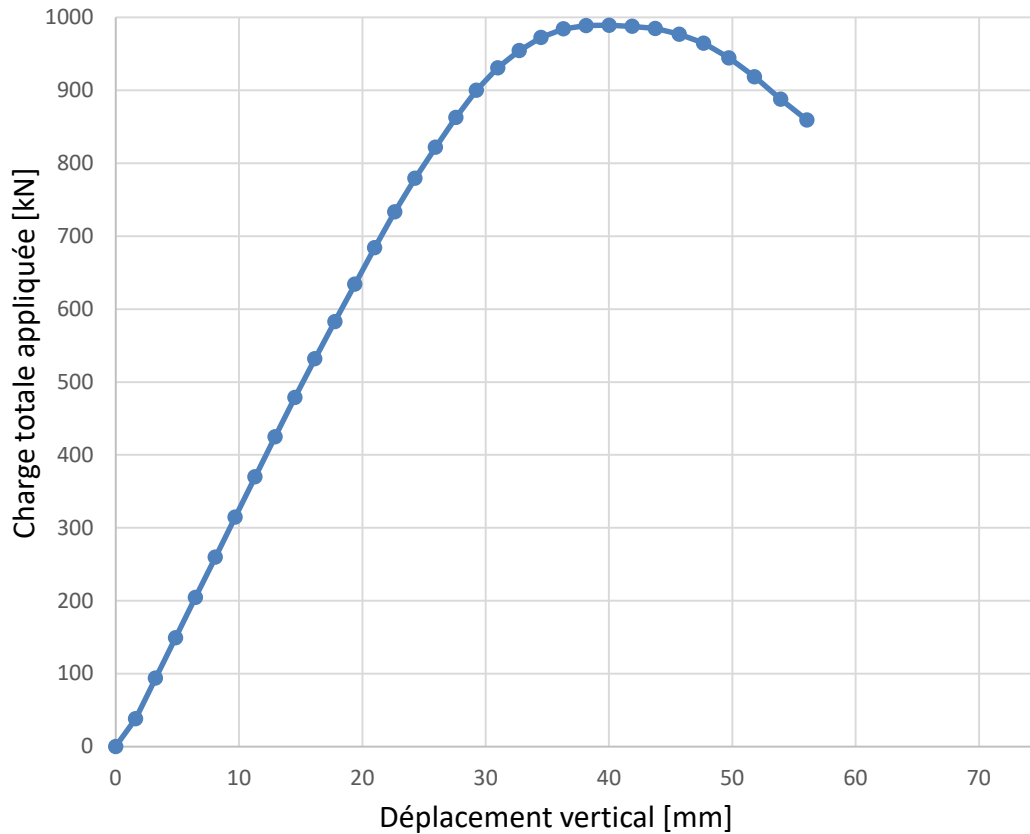
Méthode des éléments finis

- Résultats : phénomène d'instabilité → Le déversement se développe



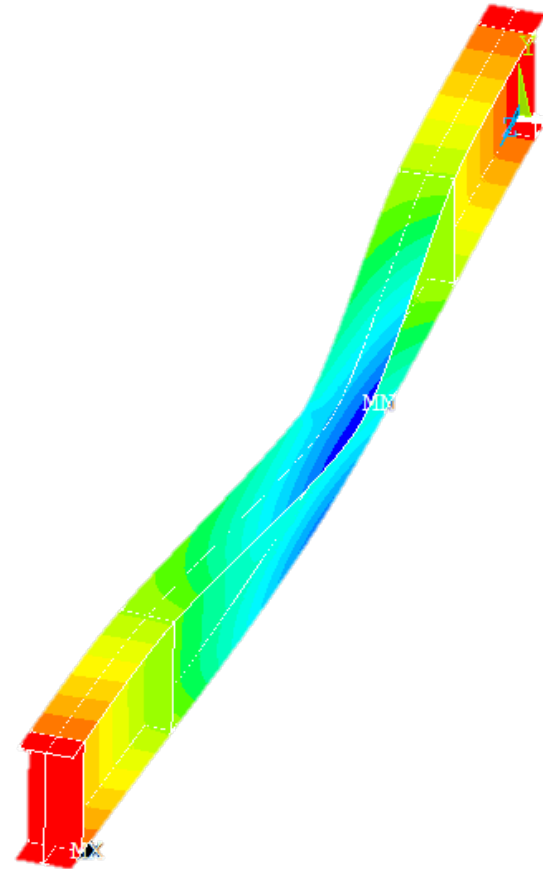
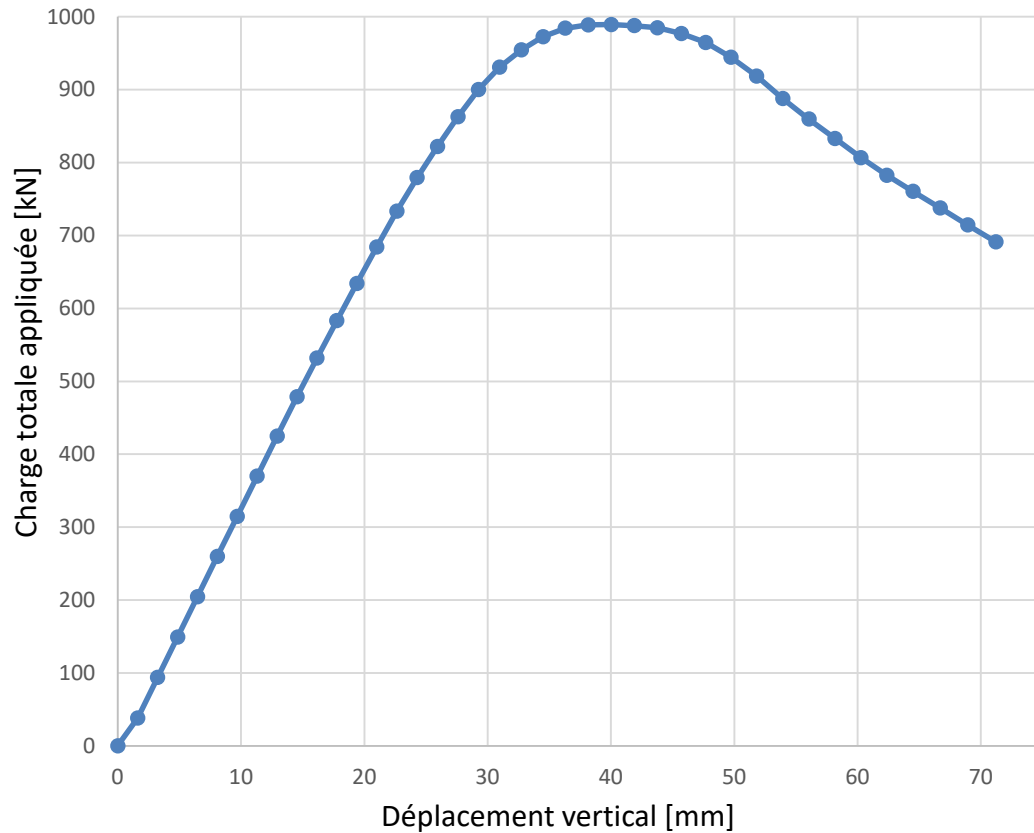
Méthode des éléments finis

— Résultats : Comportement post-instabilité



Méthode des éléments finis

— Résultats : Comportement post-instabilité



Partie 5

Flèches

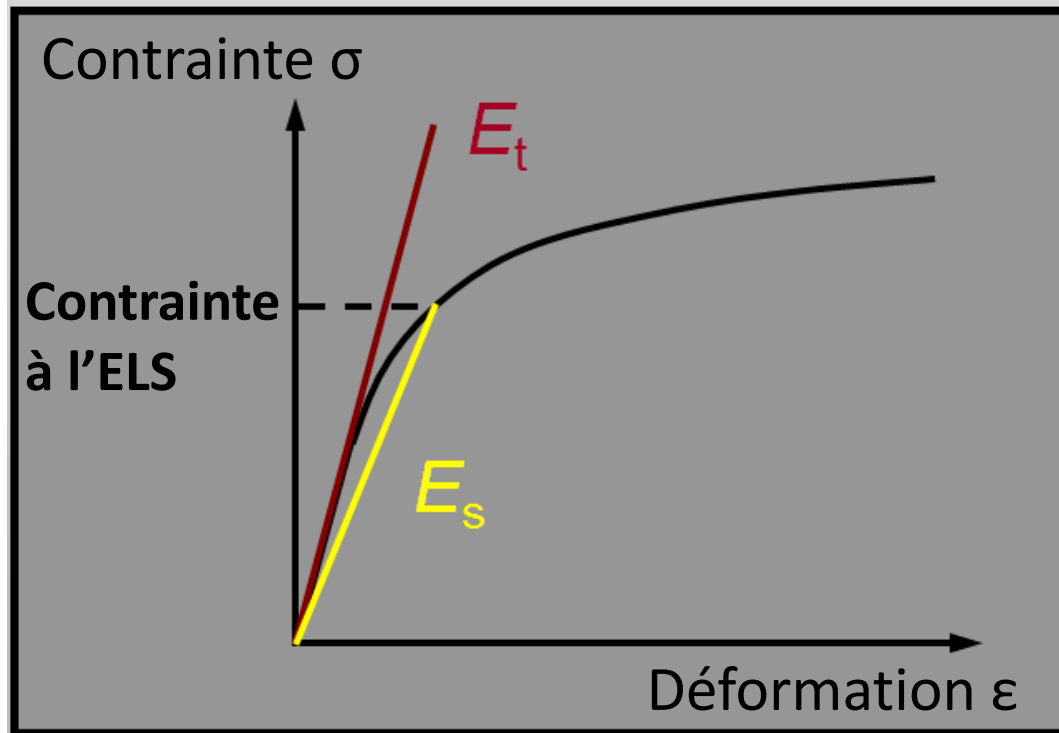


Flèches

- La non-linéarité de la courbe contrainte-déformation implique que la rigidité de l'acier inoxydable ↘ lorsque les contraintes ↗
- Ainsi, les flèches sont légèrement plus importantes avec l'acier inoxydable qu'avec l'acier au carbone
- Pour être plus précis, il est préférable d'utiliser le module sécant correspondant à la contrainte à l'état limite de service (ELS)

Flèches

Module sécant E_s pour la contrainte à l'ELS dans l'élément



Flèches

Le module sécant E_s est calculé à partir du modèle de Ramberg-Osgood :

$$E_s = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{f} \left(\frac{f}{f_y} \right)^n}$$

f est la contrainte à l'état limite de service

n est une donnée du matériau

Flèches dans une poutre en acier inoxydable austénitique

Rapport de contraintes f / f_y	Module sécant E_s GPa	Augmentation de la flèche (en %)
0,25	200	0
0,5	192	4
0,7	158	27

f = contrainte à l'état limite de service (ELS)

Partie 6

Informations complémentaires



Réponse aux charges sismiques

- Une plus grande ductilité (inox austénitiques) permet de supporter un nombre de cycles de charge plus grand
→ plus grande dissipation hystérétique d'énergie sous chargement cyclique
- Une plus grande capacité d'écrouissage
→ facilite le développement de zones plastiques plus grandes & plus déformables
- Une plus grande dépendance du taux de déformation
→ plus grande résistance pour des déformations brusques

Calcul des assemblages boulonnés

- La résistance et le comportement face à la corrosion des boulons et des matériaux assemblés doivent être assez proches.
- Des boulons en acier inoxydable doivent être utilisés pour assembler des barres en inox afin d'éviter la corrosion galvanique
- Des boulons en acier inoxydable peuvent aussi être utilisés pour assembler des barres en acier galvanisées ou en aluminium

Calcul des assemblages boulonnés

- Les règles pour les jeux de boulons de l'acier au carbone peuvent généralement être appliquées à l'acier inoxydable (traction, cisaillement)
- Des règles spéciales sont nécessaires pour la résistance à la pression diamétrale afin de limiter la déformation due à la ductilité élevée de l'acier inoxydable

$$f_{u,red} = 0,5f_y + 0,6f_u < f_u$$



Boulons précontraints

Ils sont intéressants pour des structures comme les ponts, les pylônes, les mâts, etc., lorsque :

- les assemblages sont soumis à des vibrations,
 - il faut éviter un glissement entre les pièces assemblées
 - les charges appliquées sont alternées et varient fréquemment
-
- Il n'existe aucune règle de calcul pour les boulons précontraints en acier inoxydable
 - Des essais doivent être réalisés



Calcul des assemblages soudés

- Les règles de calcul de l'acier au carbone peuvent généralement être appliquées pour l'acier inoxydable
- Il faut utiliser les consommables qui conviennent avec la nuance d'acier inoxydable à souder
- Il est possible de souder ensemble de l'acier inoxydable avec de l'acier au carbone sous réserve de réaliser une préparation spéciale des pièces

Résistance à la fatigue

- Le comportement à la fatigue des assemblages soudés est dominé par la géométrie de la soudure
- La performance des aciers inoxydables austénitiques et duplex est au moins aussi bonne que celle de l'acier au carbone
- Il convient de suivre les spécifications de l'acier au carbone

Partie 7

Ressources pour ingénieurs



Ressources pour ingénieurs

- Centre d'information en ligne
- Étude de cas
- Guides de conception et de calcul
- Exemples de calcul
- Logiciels

100
YEARS
OF
STAINLESS
STEEL

A CENTURY OF INNOVATION

From small beginnings a hundred years ago, stainless steel has grown to be an integral part of our lives. Utilised primarily for its corrosion resistance, stainless steel is also found in applications where strength, innovation and aesthetics are important.

[VIEW WEBSITE](#)

ONLINE INFORMATION
CENTRE FOR STAINLESS
STEEL IN CONSTRUCTION

[VIEW WEBSITE](#)

DESIGN MANUAL FOR
STRUCTURAL STAINLESS
STEEL

[VIEW PUBLICATION](#)

STRUCTURAL STAINLESS
STEEL CASE STUDIES

[VIEW CASE STUDIES](#)

Centre d'information de l'acier inoxydable dans la construction : www.stainlessconstruction.com

The screenshot shows the homepage of the website. At the top, the title reads "ONLINE INFORMATION CENTRE FOR STAINLESS STEEL IN CONSTRUCTION". Below this is a navigation menu with six categories: SPECIFICATION, CODES & STANDARDS, DESIGN, FABRICATION & INSTALLATION, CASE STUDIES, and RESEARCH. The main content area on the left contains the text "Stainless steel at your fingertips..." followed by a paragraph: "This website will lead you to essential technical information about the use of stainless steel in construction." Below this is a "Featured Resource" section titled "Thames Gateway Water Treatment". At the bottom of this section is a search bar with the placeholder text "Enter search query" and a blue "GO" button. On the right side of the page, there is a large image of a circular, ribbed stainless steel structure, possibly a water treatment component, set against a blue sky background.

12 études de cas de structures

www.steel-stainless.org/CaseStudies



Structural Stainless Steel Case Study 01

Stonecutters Bridge Towers

Stonecutters Bridge, Hong Kong, is a cable stayed structure with a total length of 1596 m and a main span of 1018 m. The bridge crosses the Rambler Channel and is the main entrance to the busy Kwai Chung Container Port. It is visible from many parts of Hong Kong Island and Kowloon. The most striking features of the bridge are the twin tapered mono towers at each end supporting the 50 m wide deck. These tapered towers rise to 295 m above sea level; the lower sections are reinforced concrete while the upper 115 m are composite sections with an outer stainless steel skin and a reinforced concrete core.

Material Selection


Figure 1: General view of Stonecutters Bridge

The design life of the bridge is 120 years. A highly durable material was required for the upper sections of the bridge towers because of the harsh marine and polluted environment. Additionally, post-construction maintenance on the towers will be extremely difficult, due to the live traffic beneath. Stainless steel was chosen for the skin of the composite section of the upper tower because of its durability and also its attractive appearance. Carbon steel would have required protective coatings that would have needed reapplying after an estimated 20-30 years.


Figure 2: Mono tower and stay cables

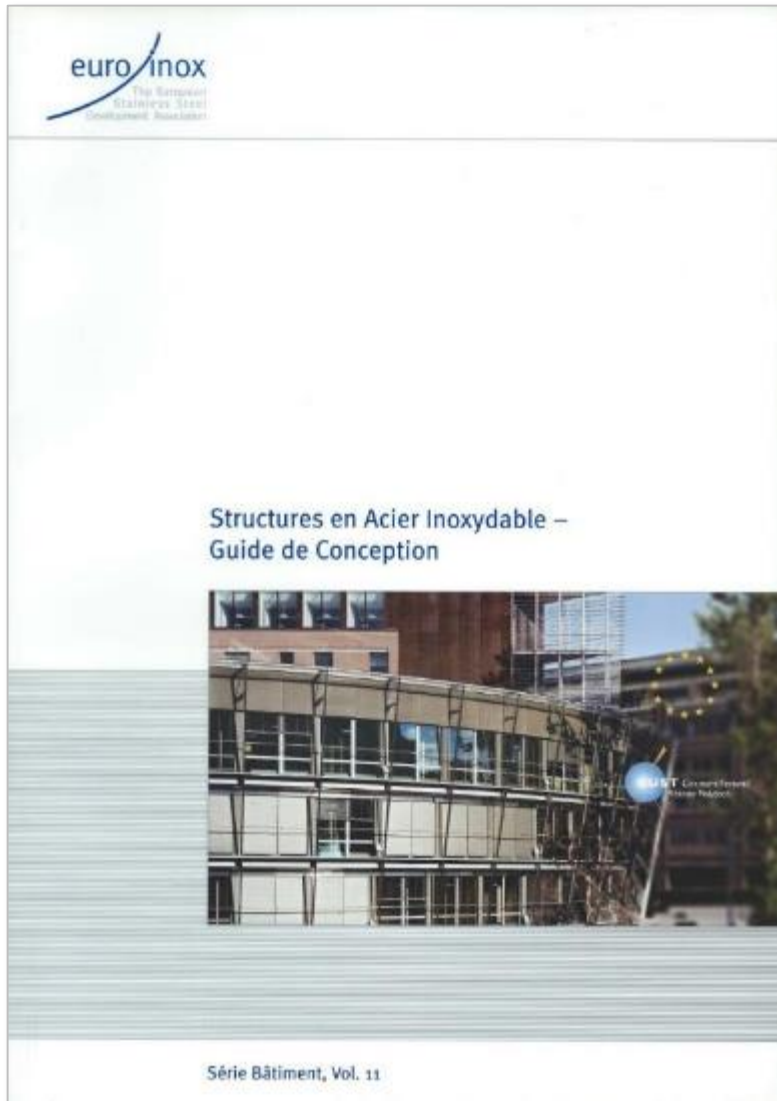
Standard non-austenitic austenitic steel grades were initially considered but discounted because of their relatively low design strength (220 N/mm²) and uncertainty regarding corrosion performance, given the roughness of the coated surface finish. Higher alloyed austenitics with better corrosion resistance, e.g. 1.4539 (N08904) and 1.4439 (S31726), were not considered in detail as they would not have met the requirements for cost, availability and strength. Duplex Steel 1.4462 (S32205) was chosen as it has high strength (462 N/mm²) with good corrosion resistance and tolerance of surface finish.

A polished 16 finish (as defined in EN 13044 Part 2 (1)) was specified for all exposed surfaces, with an average surface roughness R_a of 2.5 μ m. A slightly textured, non-directional, low reflective appearance was then created by shot peening the surface with a mixture of aluminium oxide and glass beads.

Structural Stainless Steel Case Study 01 Page 1



Guide de conception selon les Eurocodes



www.steel-stainless.org/designmanual

- Recommandations
- Commentaires
- Exemples de calcul

Logiciel de calcul en ligne :

www.steel-stainless.org/software



Résumé

- Performances structurales de l'acier inoxydable :
Similaires à celles de l'acier au carbone mais quelques modifications sont nécessaires en raison de la non-linéarité de la loi contrainte-déformation
- Des règles de calcul ont été développées
- Des ressources (guides de calcul, études de cas, exemples rédigés, logiciels, etc.) sont disponibles gratuitement !

Références

- EN 1993-1-1. Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. 2005
- EN 1993-1-4. Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-4 : Règles générales - Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables. 2006
- EN 1993-1-4. Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-4 : Règles générales - Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables. Modifications 2015
- AISI Standard. North American specification Appendix 1 : Design of Cold-Formed Steel Structural Members Using the Direct Strength Method. 2007
- B.W. Schafer. Review : The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. Journal of Constructional Steel Research 64 (2008) 766-778
- S. Afshan, L. Gardner. The continuous strength method for structural stainless steel design. Thin-Walled Structures 68 (2013) 42-49



Merci !