

Contenu des supports de cours

Finalité de ces documents :

Matériel pédagogique à destination de formations d'Architecture et de Génie Civil. Tous ces modules peuvent être utilisés dans leur ensemble ou séparément

Préparés par un groupe de travail de l'ISSF*

Membres :

- Eduardo Carragueiro (Böllinghaus)
- Thierry Cremailh (Schmolz + Bickenbach)
- Bernard Héritier (ISSF)
- Clara Herrera (Deutsche Edelstahl Werke)
- Jun Ishikawa (ISSF)
- Marco Massazza (Cogne Acciai Speciali)
- Thomas Pauly (Euro-Inox)
- Luis Peiro (Acerinox)

* International Stainless Steel Forum, Avenue de Tervueren 270, B-1150 Bruxelles www.worldstainless.org

Vérifiés par un comité consultatif


























Membres:

- Prof. Dinar Camotim (Instituto Superior Técnico, Lisbonne, Portugal)
- Prof. Katherine Cashell (Brunel University, Londres, GB)
- Prof. Christelle Gress (INSA, Strasbourg, France)
- Prof. Laura Daglio (Politecnico Milano, Italie)
- Prof. Helmut Hachul (Fachhochschule Dortmund, Allemagne)
- Prof. Satish Kumar (Indian Institute of Technology, Chennai, Inde)
- Prof. Satoshi Nara (University of Osaka, Japon)
- Prof. Esther Real (Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelone, Espagne)
- Prof. Barbara Rossi (KU Louvain, Belgique)
- Prof Antonio Santa-Rita (Universidade Lusófona, Lisbonne, Portugal)
- Prof. Pedro Vellasco (Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brésil)













Contenu

1. L'acier inoxydable et l'art
2. **A** Applications en Architecture
 - 1 - Façades
 - 2 - Murs végétalisés
 - 3 - Toitures
 - 4 - Décoration
 - 5 - Tuyauterie
 - 6 - Escaliers mécaniques et ascenseurs
 - 7 - Aéroports
 - 8 – Mobilier urbain
 - 9 - Restauration
 - 10 - Stades
 - 11 - Piscines
2. **B** Applications en génie Civil et infrastructures
 - 1 - Réseaux de distribution d'eau
 - 2 – Ponts
 - 3 – Infrastructures côtières
3. Pourquoi utiliser l'acier inoxydable ?
4. Qu'est-ce qu'un acier inoxydable ?
5. Résistance à la corrosion des aciers inoxydables
6. Propriétés mécaniques des aciers inoxydables
7. Concevoir des applications structurales
 - A – renforcement du béton
 - B – calcul des structures
8. États de surface des aciers inoxydables
9. Assemblage & fabrication des aciers inoxydables
10. Formes et disponibilité
11. Développement durable et acier inoxydable









Associations mondiales pour le développement de l'acier inoxydable (SSDA*) : où trouver & télécharger des informations libres et gratuites ?

SSDA	Website	Country/Region	Social media
ISSF	worldstainless.org	Global	   
Abinox	abinox.org.br	Brazil	  
ASSDA	assda.asn.au	Australia	  
BSSA	bssa.org.uk	United Kingdom	  
Cedinox	cedinox.es	Spain	
Centro Inox	centroinox.it	Italy	
IMINOX	iminox.org.mx	Mexico	  
ISER	edelstahl-rostfrei.de	Germany	 
ISSDA	stainlessindia.org	India	  
JSSA	jssa.gr.jp	Japan	
KOSA	kosa.or.kr	Korea	  

Associations mondiales pour le développement de l'acier inoxydable (SSDA*) : où trouver & télécharger des informations libres et gratuites ?

SSDA	Sites Internet	Pays/Régions	Réseaux sociaux
NZSSDA	nzssda.org.nz	Nouvelle Zélande	 
PASDER	turkpasder.com	Turquie	
SASSDA	sassda.co.za	Afrique du Sud	  
SSINA	ssina.com	Amérique du Nord	
CSSC	cssc.org.cn	Chine	
SSN	stalenierdzewne.pl	Pologne	
Swiss Inox	swissinox.ch	Suisse	
TSSDA	tssda.org	Thaïlande	
USSA	ussa.su	Russie	
ICDA	icdacr.com	Global	 
IMOA	imoa.info	Global	 

Associations mondiales pour le développement de l'acier inoxydable (SSDA*) : où trouver & télécharger des informations libres et gratuites ?

SSDA	Sites Internet	Pays/Régions	Réseaux sociaux
Nickel Institute	nickelinstitute.org	Global	  
ConstruirAcier	construiracier.fr/tout-sur-lacier/les-aciers-inoxydables/	France	    
Team Stainless	Stainlessconstruction.com	Global	
Stainless Steel Training Portal	issftraining.org	Global	

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

Module 1

L'acier inoxydable et l'art

**Lieu :**

Falkirk, Écosse

Matériau :

Acier de construction
recouvert d'acier
inoxydable de type 316L
(S31603)

Dimensions :

30 mètres de haut

Poids :

300 tonnes chacun

Année de création :

2013

<https://jack35.wordpress.com/2014/04/16/les-kelpies-a-helix-en-ecosse-galerie-et-video/>

« Les Kelpies » de Andy Scott ^{1,2}

Andy Scott : « Le concept original des chevaux d'eau mythiques [*du folklore celtique*] a été le point de départ du développement artistique de ces structures. Je me suis approprié ce concept et je l'ai développé avec une réponse plus chevaline et contemporaine qui prend ses distances avec les références mythologiques pour devenir un monument socio-historique célébrant le rôle des chevaux dans l'industrie et dans l'agriculture ainsi que l'association évidente des canaux et des chevaux de halage. »

**Lieu :**

Bruxelles, Belgique

Matériau :

Acier inoxydable 1.4404
(316L) poli miroir

Dimensions :

102 mètres de haut,
chacune des neuf
sphères ayant un
diamètre de 18 m

Poids :

2400 tonnes

Année de création :

1958

« L'Atomium » - Conception : A. Waterkeyn ; Architectes : A. & J. Polak^{3, 4}

L'Atomium a été construit pour l'exposition universelle de Bruxelles en 1958. Ses neuf sphères représentent la structure d'un cristal de fer grossi 165 milliards de fois. Lors de la rénovation effectuée entre 2004 et 2006, le revêtement d'aluminium des sphères, terni, a été remplacé par de l'inox.

L'Atomium a été appelé par CNN l'édifice le plus bizarre d'Europe !

Il demeure une des attractions les plus visitées de Bruxelles.



Lieu :
Saint-Louis, MO, USA

Matériau :
Revêtement en acier
inoxydable AISI 304

Dimensions :
192 m de haut

Poids :
4164 tonnes

Année de création :
1965

« Gateway Arch » - Concepteur : E. Saarinen ; Ingénieur : H. Bandel ^{5, 6}

Conçu pour être *“un mémorial public adéquat et permanent pour les hommes qui ont rendu possible l'expansion territoriale dans l'Ouest des États-Unis...”*, l'arche de Saint-Louis, MO, USA, de 192 m de haut est l'arche la plus grande u monde et elle est devenue le symbole de la ville. Elle pèse 4164 tonnes dont 803 tonnes de revêtement en acier inoxydable.



Lieu :

Chicago, USA

Matériau :

Panneaux en acier
inoxydable 304 poli-
miroir

Dimensions :

10 × 20 × 13 m

Poids :

100 tonnes

Année de création :

2004

« Cloud Gate » de Sir Anish Kapoor ^{7, 8}

Le « Cloud Gate » (littéralement « La porte des nuages ») est la première réalisation extérieure de l'artiste britannique Anish Kapoor, installé aux États-Unis. Cette sculpture elliptique de 110 tonnes est constituée d'une série de panneaux en acier inoxydable poli-miroir sans soudure qui réfléchissent les célèbres gratte-ciel de Chicago avec les nuages au-dessus. La forme concave de la partie inférieure de la structure forme un arc haut de 3,65 mètres créant ainsi une « porte » qui invite les visiteurs à toucher la surface poli miroir et à voir leur image réfléchi sur une variété de perspectives. Inspirée de mercure liquide, cette sculpture est l'une des les plus grandes de ce type au monde.



Lieu :
Normandie, France

Matériau :
Acier inoxydable 2205 et 316L

Dimensions :
9 m de hauteur

Poids :

Année de création :
2004

« Les Braves » d'Anilore Banon ^{9 - 10}

Ce mémorial est érigé sur la plage d'Omaha Beach dans le village de Saint-Laurent-sur-Mer en Normandie. Il commémore les soldats qui sont tombés sur les plages de Normandie le « jour J », 6 juin 1944. Le mémorial a été inauguré le 5 juin 2004 pour le 60^{ème} anniversaire du débarquement.



Lieu :
Musée d'art de Toledo,
Toledo, OH, USA

Matériau :
Acier inoxydable peint

Dimensions :
377 × 235 × 245 cm
chacun

Poids :

Année de création :
2010

« Miroir I et II » de Jaume Plensa ^{12, 13}

Le concept principal de cette œuvre est celui du dialogue. Les deux figures se font face l'une à l'autre comme dans une conversation silencieuse perpétuelle. Le titre, *Miroir*, montre ce que chaque silhouette représente pour l'autre – la réflexion de ses pensées et de ses rêves. Il y a assez de place entre les deux personnages pour que le spectateur puisse prendre place et « rentrer » dans la conversation. Les silhouettes sont constituées de lettres provenant de huit alphabets : arabe, chinois, grec, hindou, hébreu, japonais, latin et russe. L'artiste considère ce dialogue et cet échange comme essentiels pour apprendre et, plus important, pour se comprendre entre peuples et cultures.



Lieu :
Musée Guggenheim,
Bilbao, Espagne

Matériau :
Bronze, marbre et acier
inoxydable

Dimensions :
9 × 10 × 12 m

Poids :

Année de création :
1999

« Maman » de Louise Bourgeois ¹⁴

Le titre « *Maman* » met en valeur les contradictions dynamiques au cœur de la sculpture. Pourquoi l'araignée ? « *Parce que ma meilleure amie était ma mère et qu'elle était volontaire, intelligente, patiente, apaisante, raisonnable, tendre, subtile, indispensable, soignée, et aussi utile qu'une araignée. Elle pouvait aussi se défendre elle-même, comme moi, en refusant de répondre aux questions personnelles « stupides », inquisitrices et embarrassantes* ».



Lieu :
Helsinki, Finlande

Matériau :
600 tubes d'acier
inoxydable
Grade: EN 1.4404
(AISI 316L)

Dimensions :
Hauteur 8,5 m,
largeur 10,5 m et
profondeur 6,5 m

Poids :
24 tonnes

Année de création :
1967

« Monument Sibelius » d'Eila Hiltunen (1967) ¹⁵

Le monument Sibelius à Helsinki, Finlande, est dédié au compositeur finlandais Jean Sibelius. Pesant environ 24 tonnes, la sculpture est constituée de plus de 600 tubes en acier inoxydable, soudés ensemble en forme de vague faisant penser à des tuyaux d'orgue.



Lieu :

Oslo, Norvège

Matériau :

Acier inoxydable et
panneaux de verre

Dimensions :

12 × 17 × 16 m

Poids :

Année de création :

2010

« Hun Ligger » (Elle est) de Monica Bonvicini ¹⁶

Cette œuvre permanente flotte sur une plateforme en béton dans le fjord à proximité de l'opéra d'Oslo, à 12 m au-dessus de la surface de l'eau. La sculpture tourne sur son axe selon la marée et les vents, offrant des visions changeantes au gré des réflexions de l'eau et de sa surface transparente.



Lieu :

Jérusalem

Matériau :

Acier inoxydable poli

Dimensions :

5 m de haut et 5 m de diamètre

Poids :

Année de création :

2010

« Mettre le monde à l'envers » de Sir Anish Kapoor ¹⁷

L'œuvre en acier inoxydable mesure 5 m de hauteur et 5 m de diamètre et elle renvoie toute la ville de Jérusalem dans le ciel, signifiant son importance spirituelle comme cité divine.



Lieu :
Reykjavík, Islande

Matériau :
Acier inoxydable

Dimensions :
9 × 18 × 7 m

Poids :

Année de création :
1990

« Solfar » (Le voyageur du soleil) de Jon Gunnar Arnason ¹⁸

“Le voyageur du soleil est un bateau de rêve, une ode au soleil. Intrinsèquement, il contient en son sein la promesse d'un territoire inconnu, un rêve d'espoir, de progrès et de liberté”.

La sculpture est située à Sæbraut, au bord de la mer, près du centre de Reykjavík, en Islande.



Lieu :
Jardins de Trentham, GB
Matériau :
Câbles d'acier inoxydable
Dimensions :

Poids :

Année de création :

« Fantasywire » de Robin Wight ¹⁹

Sculpteur britannique, Robin Wight crée des scènes dramatiques de fées emportées par le vent en brandissant un fruit de pissenlit, ou s'accrochant aux arbres, et semblant suspendues dans l'air. Toutes sont réalisées à partir d'une enveloppe dense de fils en acier inoxydable. Plusieurs œuvres de l'artiste sont visibles dans les « Trentham Gardens » à Stoke-on-Trent, GB.

<http://www.fantasywire.co.uk/>



Lieu :
Versailles, France
Matériau :
Acier inoxydable
Dimensions :
3 × 1,5 × 4 m
Poids :

Année de création :
2009

« Maryline » de Joana Vasconcelos (2009) ²¹

« *Marilyne* » prend la forme d'une élégante paire de sandales à talons hauts dont l'échelle imposante résulte de l'utilisation de faitouts et de leurs couvercles. L'in vraisemblable association, pourtant assumée, entre les faitouts et les sandales à talons hauts, deux symboles paradigmatiques des dimensions des femmes aux plans privé et public, propose une révision de la « Féminité » à la lumière des pratiques du monde contemporain. Le recours aux faitouts, signe auquel on peut associer la sphère domestique traditionnelle des femmes, pour reproduire une énorme sandale à talons hauts, symbole de beauté et d'élégance exigés par les conventions sociales, contredit l'impossibilité de la relation dichotomique de la Féminité dans les sphères domestiques et sociales. L'objet représenté émerge alors comme panégyrique de la dualité féminine qui insinue la pleine réalisation de l'individualité au travers de la subversion des normes sociales.

**Lieu :**

Tuxtla Gutierrez, Mexique

Matériau :

Acier inoxydable revêtu

Dimensions :

48 m (62 m avec le socle)

Poids :

2000 tonnes

Année de création :

2007

« Le Christ de Chiapas » - Architecte : Jaime Latapi Lopez ²⁰

Le "Christ de Chiapas" est une croix impressionnante, recouverte d'acier inoxydable de couleur or, accentuant ainsi l'image du Christ qui brille au soleil.

**Lieu :**

New York, USA

Matériau :

Acier inoxydable à haute teneur en chrome avec revêtement coloré

Dimensions :

357 × 218 × 121 cm

Poids :**Année de création :**1 sur 5 versions uniques
1994–2007**« Sacré Cœur rouge et or » de Jeff Koons ²²**

« ...observation acide sur l'abaissement commercial du vécu émotionnel et religieux »

(New York Times)





Lieu :

Matériau :

Acier inoxydable 316L

Dimensions :

71 × 41 × 41 cm

Poids :

Année de création :

« Dichotomie » de Gil Bruvel ²³

Inspiré par la complexité de vivre pleinement dans tous les mondes à la fois, « Dichotomie » médite sur et rend hommage à la nature duale de l'existence. Composée de « rubans d'énergie » qui cherchent à capter le processus d'engagement de tous les niveaux de l'être pour être pleinement humain, la sculpture reflète la force de la nature et la majesté tranquille inhérente à l'intégration des différents niveaux de l'existence. En conséquence, le personnage habite un espace méditatif serein qui embrasse pleinement la dichotomie des existences : anima et animus, mâle et femelle, conscience et inconscience, éveil et rêve.

**Lieu :**

Charlotte, NC, USA

Matériau :

acier inoxydable

Dimensions :

8 m de haut

Poids :

14 tonnes d'acier inoxydable

Année de création :

2011

« Métamorphose » de David Černý ²⁴

La structure se compose de sept strates séparées qui pivotent de manière intermittente en décomposant les traits de la silhouette. Des programmes spécifiques contrôlent des moteurs intégrés au sein de la structure, pour orchestrer les séquences chorégraphiées. Chaque moteur possède un commutateur retour pour que l'ordinateur sache où est chaque pièce à un moment donné, permettant ainsi des mouvements aléatoires à l'intérieur des séquences. Le mouvement est contrôlé via Internet par David lui-même et représente la continuité de son travail qui englobe la mécanique et l'informatique comme parties intégrantes de la conception.

Une vidéo en temps réel de la sculpture en mouvement peut être vue sur www.metalmorphosis.tv

**Lieu:**

A mi-chemin entre
Oslo et Trondheim,
Norvège

Matériau : Inox 316L
poli

Dimensions :

H: 10.3m

L: 11,5m

Poids :

Date de création :
2015

Linda Bakke : Le Gros Elan²⁵

Le Gros Elan, conçu par l'artiste norvégienne Linda Bakke, se trouve sur l'aire de pique-nique de Bjøråa sur la commune de Stor-Elvdal, à mi-chemin entre Oslo et Trondheim. Cette réalisation est non seulement superbe mais permet d'attirer l'attention des conducteurs et à les inciter à s'arrêter pour se détendre et se reposer, ce qui améliore la sécurité routière.

Le Gros Elan a aussi focalisé l'attention sur les animaux et est devenu un symbole régional.

Le fonds pour l'art de Sparebanken Hedmark a contribué pour 2 millions de couronnes norvégiennes (207 000€) au financement de l'œuvre.

<http://lindabakke.webs.com/sculptureskulptur.htm>



Lieu : Paris
Place Augusta
Holmes
Matériaux : Acier
Inoxydable, verre et
plastique
Poids :
Date de création :
2008

Chen Zhen: La danse de la fontaine émergente ²⁶

La fontaine, créée par l'artiste franco-chinois, ressemble à un dragon émergent et plongeant dans le sol de la place. La peau transparente du dragon permet de voir l'écoulement de l'eau à l'intérieur.

La fontaine est constituée de 3 parties :

Un bas-relief opaque représentant un dragon qui émerge du mur de l'usine de distribution d'eau et qui plonge dans le sol. Puis deux autres parties transparentes où l'on voit le dragon jaillir du sol puis s'y replonger. L'eau sous pression qui circule à l'intérieur est éclairée la nuit.

La fontaine a été commandée par la Ville de Paris en 1999 et inaugurée les 6 février 2008. Bien que l'artiste soit malheureusement décédé en 2000, les esquisses qu'il a laissées montraient ce à quoi la fontaine devait ressembler ce qui a permis à Xu Min, sa conjointe et collaboratrice de la réaliser.

Le coût de la fontaine est 1.2M€, très majoritairement financée par la Ville de Paris et le Ministère de la Culture .

Sources : Wikipedia et <https://www.parisladouce.com/2013/03/paris-la-danse-de-la-fontaine-emergente.html>



Lieu : Barcelone,
Espagne
Matériau: Acier
inoxydable
Dimensions : H : 38m
L: 58m
Poids : inconnu
Année : 1992

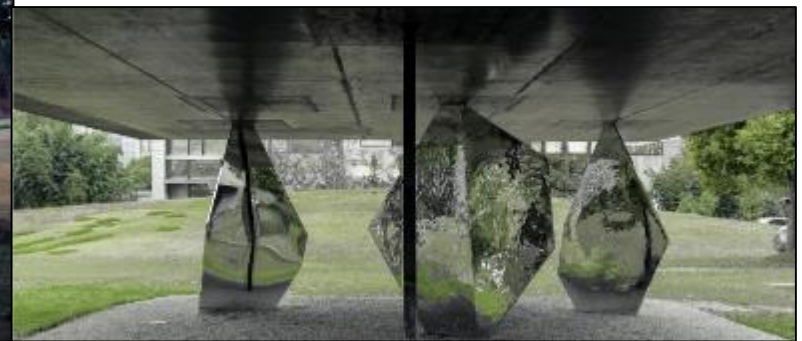
Frank Gehry: Le poisson d'or ²⁷

El Peix d'Or est une sculpture en treillis métallique représentant un poisson ondulant à bouche ouverte. Ses écailles en inox coloré bronze brillent sous le soleil méditerranéen et changent d'aspect selon l'orientation du soleil et les conditions météo, accentuant ainsi un aspect organique de cette vaste structure.

Le Poisson d'Or, El Peix en catalan, a été créé pour les JO de Barcelone en 1992.

La structure sert de canopée pour un centre commercial qui relie le luxueux Hotel Arts au front de mer près du port de plaisance olympique. El Peix d'Or est un des édifices préférés et étonnants du bord de mer à Barcelone.

<http://www.barcelonaturisme.com/wv3/en/page/1232/peix-fish-frank-gehry.html>



Lieu: Shanghai, Chine
Matériau: Acier inoxydable
Dimensions : H : 8m L: 12m
Poids : inconnu
Année : 2015

Zhan Wang + Atelier Deshaus: Pavillon des Fleurs²⁸

Les sculptures en inox [Rockery Series](#) sur lesquelles l'artiste Zhan Wang a travaillé depuis 1995 ont constitué le point de départ de ce projet. [Atelier Deshaus](#) a réinterprété ces formes en éléments de structure afin de créer un pavillon sur le modèle d'un jardin minéral. Six colonnes élancées en forme de rocher soutiennent un toit en massif en acier sur lequel poussent des plantes et des fleurs. Les colonnes réfléchissantes sont positionnées aléatoirement plutôt qu'aux points structurellement optimaux, afin de renforcer l'impression de rochers naturels

<https://www.archdaily.com/792211/blossom-pavilion-atelier-deshaus/5799b693e58ece81bd00004a-blossom-pavilion-atelier-deshaus-photo>



Matériau: Acier inoxydable
Dimensions : taille réelle
Poids : inconnu
Année : -

Martin Debenham: Sirène 3 ²⁹

Le sculpteur contemporain Martin Debenham crée des œuvres inspirées par la nature et le rêve en utilisant du fil inox. En travaillant ce matériau malléable qui offre des possibilités infinies, l'artiste autodidacte a réalisé des structures de [wire art](#) remarquables par formage, toronnage et soudage. Apparaissant comme des dessins au trait en 3 dimensions, la plupart des chefs d'œuvre de Debenham sont prévus pour être vues à l'extérieur. Placés dans la nature, miroitants au soleil, ils évoquent des histoires mythiques. Par exemple, ici, une sirène faite de fils est assise sur un rocher près d'un étang de nénuphars, et semble se demander si elle va aller nager. Chaque brin de fil est conformé pour représenter les lignes du corps féminin, pour se fondre en une longue nageoire de sirène

<https://mymodernmet.com/wire-sculptures-martin-debenham/>



Lieu :

Matériau :

Acier inoxydable poli & coloré

Dimensions :

3 panneaux de
1 m × 1 m chacun

Poids :

Année de création :

2011

« Surge » de Robert Gahr ³⁰

Sculpture murale

Lieu :

Matériau :

Dimensions :

2,1 mètres de hauteur

Poids :

Année de création :



« Kinetic Wind Sculpture #1 », sculpture de Ralfonso Karo ³¹

Il s'agit de 25 éléments en acier inoxydable en forme de pointe de diamant, reliés entre eux et en équilibre, qui se balancent indépendamment les uns des autres au gré du vent. Cliquer [ici](#) pour voir la vidéo (4'51'')



Lieu: Corée du Sud

Matériau Inox
peint

Dimensions:
273x160x95cm

Poids:

Année de création:
2017

**NOUVEAU
2019!**

Sun Hyuk Kim: Mémoire Oubliée ^{32, 33}

L'artiste Sun-Hyuk Kim s'inspire des racines des plantes pour construire une forme humaine. De chaque forme pousse une branche ou un arbrisseau qui donne l'impression d'un hybride plante-humain. Dans ces structures en inox on peut aussi voir des fragments de visage, des corps sans tête, des silhouettes penchées vers le sol comme si elles portaient une grosse charge sur leur dos.

Nous pouvons nous projeter dans les structures minimalistes de Kim. Elles donnent l'impression de fragilité. Nous avons tous eu l'expérience d'être tirillé dans des directions opposées et l'état souvent inconfortable qui accompagne la croissance et le changement. Mais cette connaissance partagée nous rapproche et nous rappelle que l'expérience d'être humain est vaste et toujours changeante – comme celle d'un arbre.

Et il y en a beaucoup d'autres !

<http://www.worldstainless.org/applications/art>

Si vous connaissez d'autres œuvres remarquables, merci de nous les faire connaître !



Références (1/3)



1. <http://www.andyscottsculptor.com/>
2. http://en.wikipedia.org/wiki/The_Kelpies
3. <http://atomium.be/>
4. <http://en.wikipedia.org/wiki/Atomium>
5. <http://www.gatewayarch.com/>
6. http://en.wikipedia.org/wiki/Gateway_Arch
7. http://www.cityofchicago.org/city/en/depts/dca/supp_info/millennium_park_artarchitecture.html
8. http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_Gate
9. <http://saintluciasculpturepark.com/portfolio/anilore-banon/>
10. <http://www.war-memorial.net/The-Braves---Les-Braves-1.292>
11. <https://www.youtube.com/watch?v=yHkOQWPZhyM>
12. <https://jaumeplensa.com/works-and-projects/public-space/mirror-2012>
13. <https://www.theguardian.com/artanddesign/2011/mar/30/jaume-plensa-show-at-yorkshire-sculpture-park>
14. <https://www.theguardian.com/arts/gallery/2007/oct/03/spider>
15. <http://www.eilahiltunen.net/monument.html>

Références (2/3)



16. <http://monicabonvicini.net/work/she-lies/>
17. <http://anishkapoor.com/111/turning-the-world-upside-down>
18. <https://www.gpsmycity.com/attractions/sun-voyager-28054.html>
19. <http://twistedgifter.com/2014/07/wire-fairy-sculptures-by-robin-wight/>
20. <http://megaconstrucciones.net/?construccion=cristo-chiapas>
21. http://joanavasconcelos.com/det_en.aspx?f=2393&o=933
22. <http://www.jeffkoons.com/artwork/celebration/sacred-heart>
23. <http://www.bruvel.com/exhibitions/houston-art-fair-2015>
24. <http://twistedgifter.com/2011/10/metalmorphosis-sculpture-david-cerny/>
25. <https://www.dailyscandinavian.com/the-worlds-biggest-elk-statue-in-norway/>
26. <https://www.parisladouce.com/2013/03/paris-la-danse-de-la-fontaine-emergente.html>
27. <http://www.barcelonaturisme.com/wv3/en/page/1232/peix-fish-frank-gehry.html>
28. <https://www.archdaily.com/792211/blossom-pavilion-atelier-deshaus/5799b693e58ece81bd00004a-blossom-pavilion-atelier-deshaus-photo>

Références (3/3)



29. <https://mymodernmet.com/wire-sculptures-martin-debenham/>
30. [http://www.gahr-metalart.com/artworks/metal wall art.htm](http://www.gahr-metalart.com/artworks/metal_wall_art.htm)
31. <http://www.ralfonso.com>
32. <https://mymodernmet.com/sun-hyuk-kim-stainless-steel-sculptures/>
33. <https://www.sunhyuk.com/sculpture>

Merci !

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

Module 2A

Applications des aciers inoxydables

Contenu

1. Façades
2. Murs végétalisés
3. Toitures
4. Décoration
5. Tuyauteries
6. Escaliers mécaniques et ascenseurs
7. Aéroports
8. Mobilier urbain
9. Rénovation
10. Stades
11. Piscines

1. Façades



Dans le sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

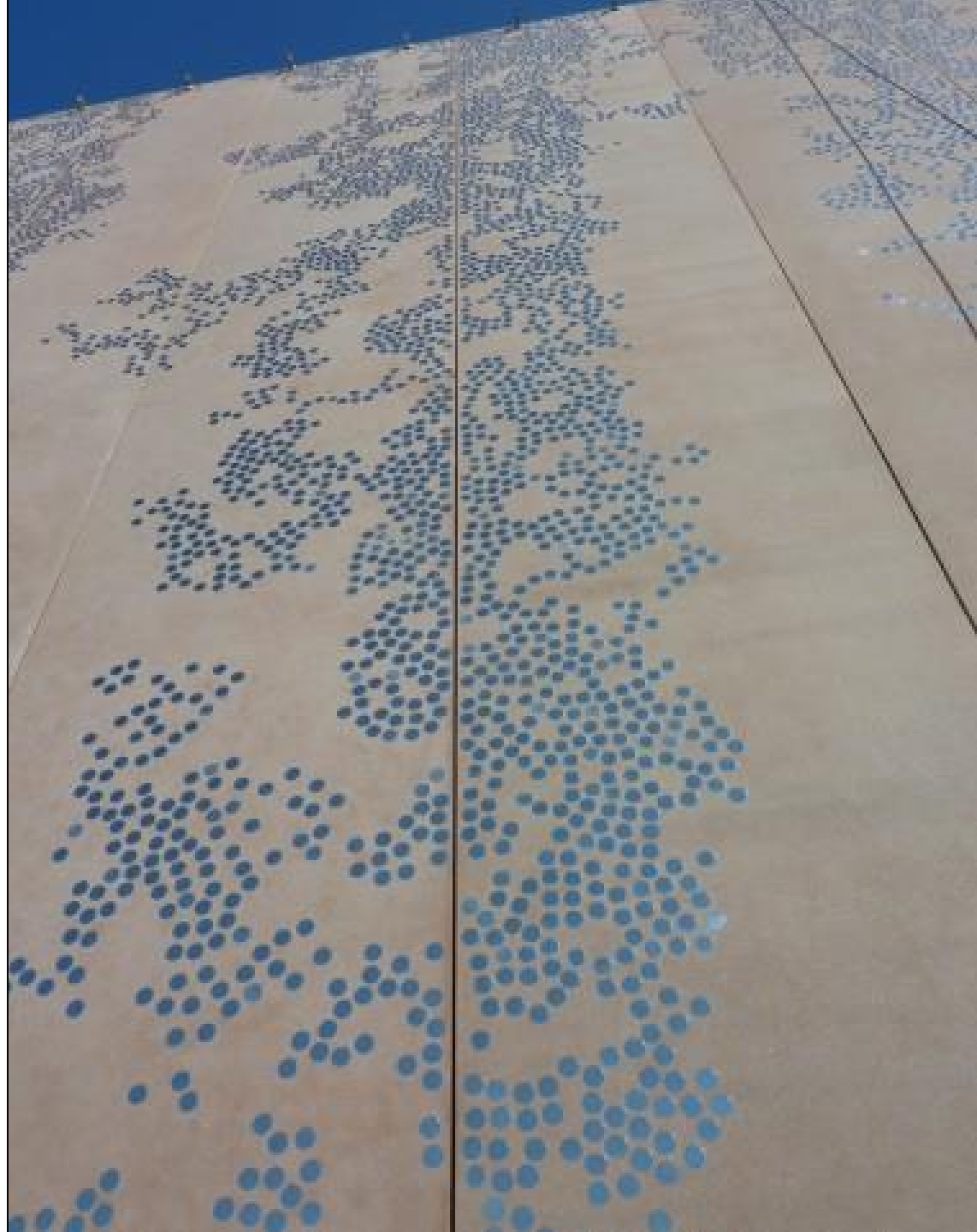
1. Façade du centre commercial Westfield Doncaster à Victoria, Australie ⁴
2. Brise-soleil en mailles tissées en acier inoxydable sur la façade d'une école près de Washington, DC, USA. Il réduit l'éblouissement, offre un gain d'énergie et une bonne transparence ⁶
3. Auvent en mailles d'acier inoxydable au dessus d'une cour intérieure, Arizona, USA. Il optimise la protection solaire tout en permettant la ventilation naturelle ⁶
4. Centre de recherche médicale « Lou Ruvo » conçu par Frank Gehry, Las Vegas, USA ⁵

Façade en acier inoxydable d'un immeuble d'habitation de 285 m de haut, New York, USA.

Architecte : Frank Gehry⁷



Inserts en acier inoxydable réfléchissant sur le mur en béton d'un bâtiment d'archives, Bure-Saudron (51), France⁸





Musée d'art F. R. Weismann, Minneapolis, USA (1993)

Architecte : Frank Gehry⁹

Franck Gehry : « J'ai toujours estimé que l'architecture passait d'abord par les matériaux, en observant mes amis artistes travailler directement avec la matière : le bon produit est celui qui semble correct, réel, acceptable et pas artificiel. »

Pour le musée Weisman, Franck Gehry a choisi l'acier inoxydable... Sa surface brillante, réfléchissante et extrêmement durable, donne au bâtiment son identité unique.



Centre culturel Kauffman, Kansas City, USA (2011)

Architecte : Moshe Safdie ; Ingénierie : Arup¹⁰

Face au centre ville de Kansas City, l'élévation Nord du bâtiment est constituée d'une série de voiles en arcs gainés d'acier inoxydable jaillissant du sol comme une vague. De sa crête, un toit incurvé en verre descend vers le quartier « Crossroads » au Sud et finit par une paroi de verre de 20 m de haut et de 100 m de long, offrant une vue panoramique sur Kansas City à partir du grand hall Brandmeyer du Centre Kauffman. La remarquable façade en verre et la toiture sont ancrées par 27 câbles en acier à haute résistance qui font penser à un instrument à cordes.



Centre Len Lye, New Plymouth, Nouvelle Zélande
Architecte : A. Patterson¹¹

Façade de 14 m de haut, réalisée à partir de 32 tonnes d'acier inoxydable type 316 poli miroir.



Siège de Delhi Metro Rail, Inde
Architecte : Raj Rewal & Associés¹²

Les architectes Raj Rewal & Associés ont conçu un parement pour ce bâtiment à New Delhi, associant des treillis tubulaires en acier inoxydable, des panneaux également en acier inoxydable et des panneaux de verre trempé.



Chaufferie du district, Turin, Italie

Architecte : J.P. Buffi¹³

Le bâtiment est habillé par des écrans cintrés.

Des bandes d'acier inoxydable colorées cuivre séparées par des interstices laissent apercevoir l'installation.



Tour Capital Gate (2010), Abu Dhabi RMJM, Architectes¹⁴⁻¹⁶

La « cape » en acier inoxydable qui descend du 19^{ème} étage, est à la fois un élément de design et une ombrière qui réduit de plus de 30 % le rayonnement solaire. Elle s'enroule autour du bâtiment en direction du Sud pour protéger, autant que possible, la tour de la lumière directe du soleil.

La « cape » est constituée de 580 panneaux pour un total d'environ 5000 m² de mailles en acier inoxydable.



Façade de verre¹⁷

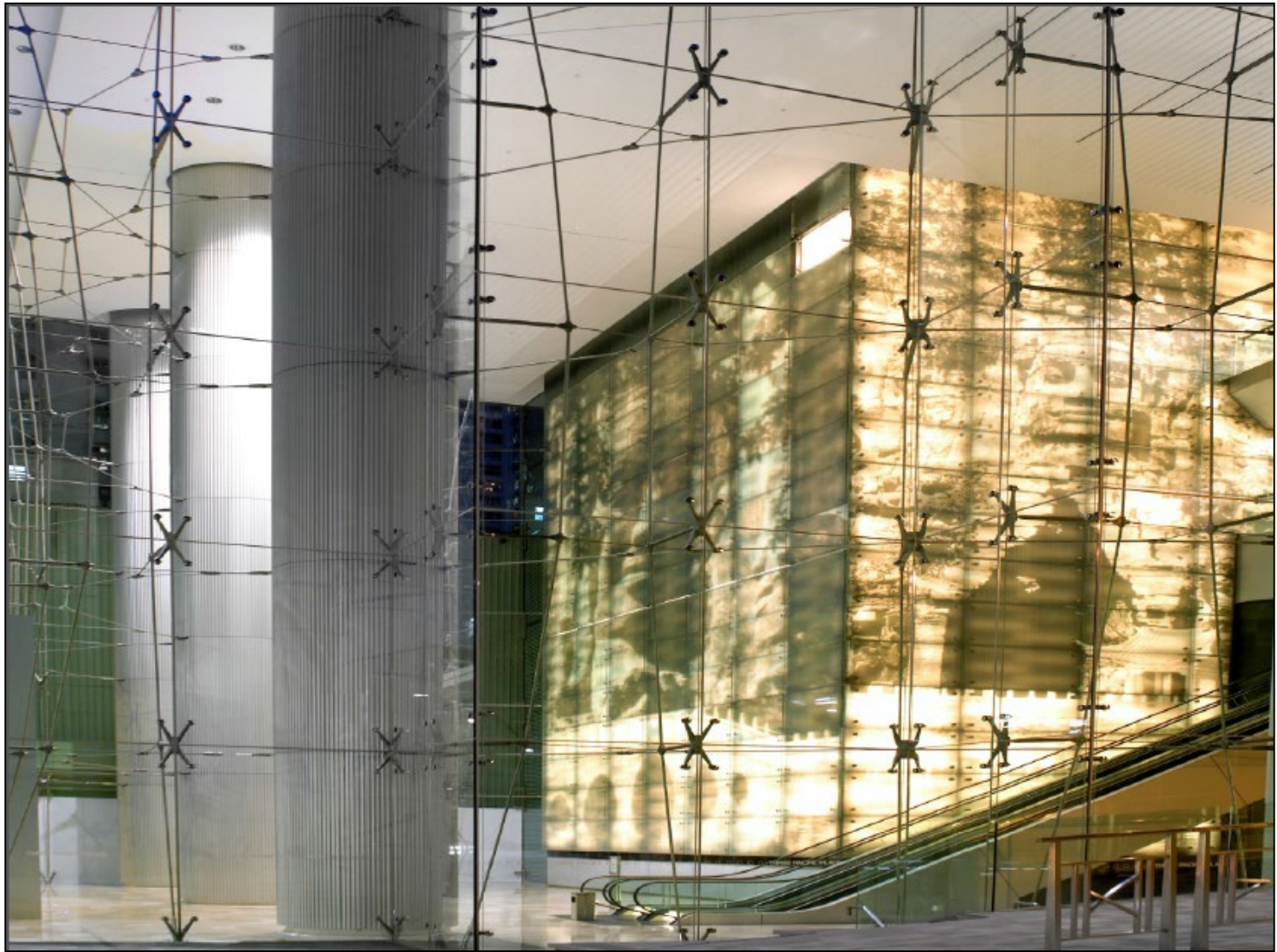
Une toile de tirants d'acier inoxydable connectés par des nœuds porte la façade de verre. Elle rend ainsi maximale l'aire ouverte à la lumière, angles compris.



Façade de verre, Paris ¹⁸

La façade de verre est supportée par une structure légère en acier inoxydable à haute résistance.

La sphère à l'arrière plan est la «Géode», un cinéma unique à 360° revêtu d'acier inoxydable et faisant partie de la «Cité des Sciences et de l'industrie».



Façade de verre, Paris¹⁸



Façade en mailles tissées d'un bâtiment de bureaux, Utrecht, Pays-Bas¹⁹
Architectes : Cepezed

Cette façade en mailles tissées de 3000 m² en acier inoxydable supporte des disques de plastique transparents.

Le vent provoque des vibrations des mailles et des mouvements des disques entraînant des ondulations et des effets de lumière.



Bâtiment à basse consommation en énergie, Nantes, France²⁰

Architectes : FORMA 6 & B. Dacher

Les formes complexes de la façade en acier inoxydable, découpées au laser, lui donnent un aspect original.



Centre Universitaire McGowan, Washington, DC, USA Pare-soleil en mailles tissées⁶

Le centre universitaire McGowan est un bâtiment d'enseignement universitaire.

La conception de l'ouvrage intègre un atrium au centre du bâtiment dont la façade extérieure, ventilée, est orientée directement vers l'Est.

Le pare-soleil en acier inoxydable réduit l'éblouissement diurne et le besoin en climatisation estival. Des pare-soleil métalliques classiques ne pouvaient pas être utilisés ici car une bonne transparence était cruciale. Ils n'auraient tout simplement pas offert suffisamment de surface ouverte.

Réhabilitation du Château de Rentilly, France²¹⁻²³



A gauche : Avant

En bas : Après

Un musée d'art contemporain dans le parc du château.
Les façades sont revêtues de cassettes en acier inoxydable poli miroir.

Xavier Veilhan, architecte :

*«... le bâtiment était l'ombre
de ce qu'il était...»*

*Je voulais des murs qui
pourraient réfléchir le parc qui
l'entourait... »*





Hôpital St Guy, Londres²⁴

Architecte : T. Heartherwick

Le « Boiler Suit » est une façade unique conçue pour recouvrir la chaufferie qui fournit l'énergie de l'hôpital St Guy. Elle se compose de 108 éléments ondulants en acier inoxydable tressé et elle est illuminée la nuit pour fournir un repère accueillant pour le personnel et les visiteurs arrivant à l'hôpital dans le noir.



Stade American Airlines, Miami, USA

L'écran de l'Arena , d'une surface de plus de 300m² est réalisé en tissé inox entrelacé de profilés LED (Diodes ElectroLuminescentes) Mediamesh®. Il apparait aux visiteurs du stade comme transparent regardé de l'intérieur alors que vu de l'extérieur c'est un écran média digital qui capte l'attention. Sa hauteur est d'un équivalent de 3 étages, (12 m de haut et 24m de large), soit 4 fois plus grande que celle d'un écran habituel. L'arena de Miami accueille plus de 1,3 millions de visiteurs par an pour des concerts, du sport et des événements pour familles.

Références « Façades » (1/2)

Actualisé !

1. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Facades_FR.pdf
2. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Innovative_facades_FR.pdf
3. <http://www.archiexpo.com/architecture-design-manufacturer/stainless-steel-facade-cladding-2964.html> plus d'exemples ici!
4. <http://www.steelcolor.com.au/westfield-doncaster/>
5. <http://wikimapia.org/7695594/Cleveland-Clinic-Lou-Ruvo-Center-for-Brain-Health#/photo/3116187>
6. <http://cambridgearchitectural.com/>
7. <https://newyorkbygehry.com/>
8. <http://archinect.com/firms/project/39353/edf-archives-center/9174600>
9. http://greatbuildings.com/buildings/Weisman_Art_Museum.html
10. <http://www.arcspace.com/features/moshe-safdie-/kauffman-center-for-the-performing-arts/>
11. <http://pattersons.com/civic/len-lye-contemporary-art-museum/>
12. http://www.stainlessindia.org/UploadPdf/SI_Mar08.pdf
13. <http://www.archilovers.com/projects/30432/centrale-termica-teleriscaldamento-iride-energia.html>
14. <http://www.skyscrapercenter.com/building/capital-gate-tower/3172>

Références « Façades » (2/2)

Actualisé !

15. <http://www.dailymail.co.uk/travel/article-1284591/Abu-Dhabi-Capital-Gate-skyscraper-leans-times-Tower-Pisa.html>
16. <http://www.e-architect.co.uk/dubai/capital-gate-abu-dhabi>
17. <http://hda-paris.com/>
18. <https://www.parisinfo.com/musee-monument-paris/71198/La-Geode>
19. http://issuu.com/hda_paris/docs/hda_2011_references_web_issu
20. <http://5osa.tistory.com/entry/Cepezed-and-Ned-Kahn-Studios-Vertical-Canal-fa%C3%A7ade-Utrecht-Netherlands>
21. <http://www.reseaux-artistes.fr/dossiers/beatrice-dacher/architecture-sully-2006-2010>
22. <http://www.marneetgondaire.fr/les-albums-photos/album-photos-490/le-chateau-de-rentilly-renaissance-en-2013-230.html?cHash=d2d475c49fe75ee015495efb35c04460>
23. <http://www.marneetgondaire.fr/le-parc/les-espaces-1705.html>
24. <http://www.dezeen.com/2007/08/20/boiler-suit-by-thomas-heatherwick>
25. http://www.gkdmediamesh.com/blog/the_role_of_metallic_mesh_in_transforming_stadium_architecture.html

2. Murs végétalisés

A propos des murs végétalisés

Les murs végétalisés sont de nouveaux éléments architecturaux offrant de grands avantages : meilleur confort, températures mieux contrôlées et amélioration de la qualité de l'air.

Utiliser des câbles, des barres et des mailles en acier inoxydable pour soutenir les plantes grimpantes le long de la façade d'un bâtiment, constitue une alternative aux murs végétalisés classiques.

Végétaliser les murs d'un bâtiment existant est facile à réaliser.



Façade végétalisée¹

Transformateur, Barcelone, Espagne.

Des attaches et des câbles en acier inoxydable supportent les plantes.



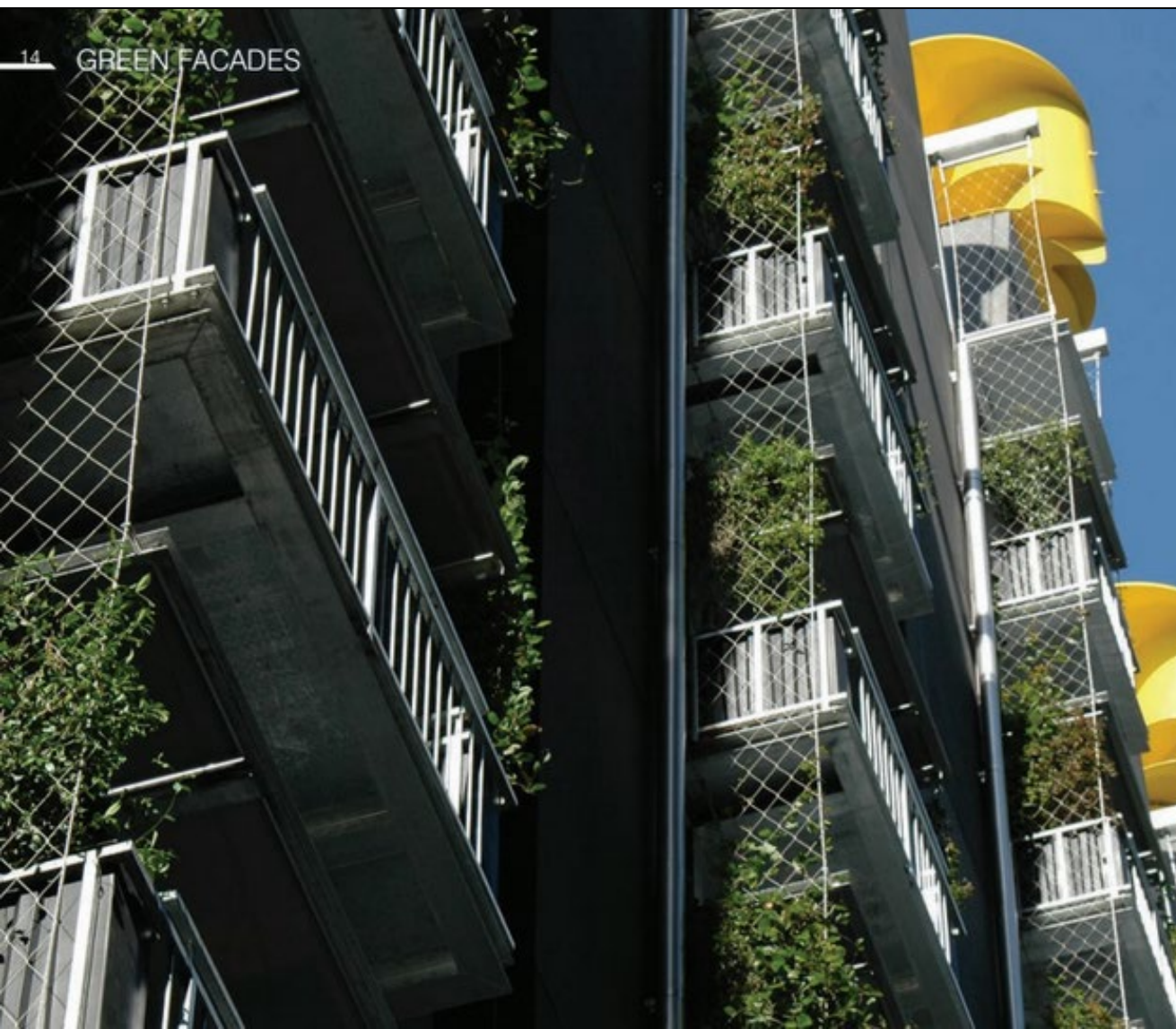
Nouveau !

Façade végétalisée²

Quelques années plus tard. L'esthétique est améliorée.

Nouveau !

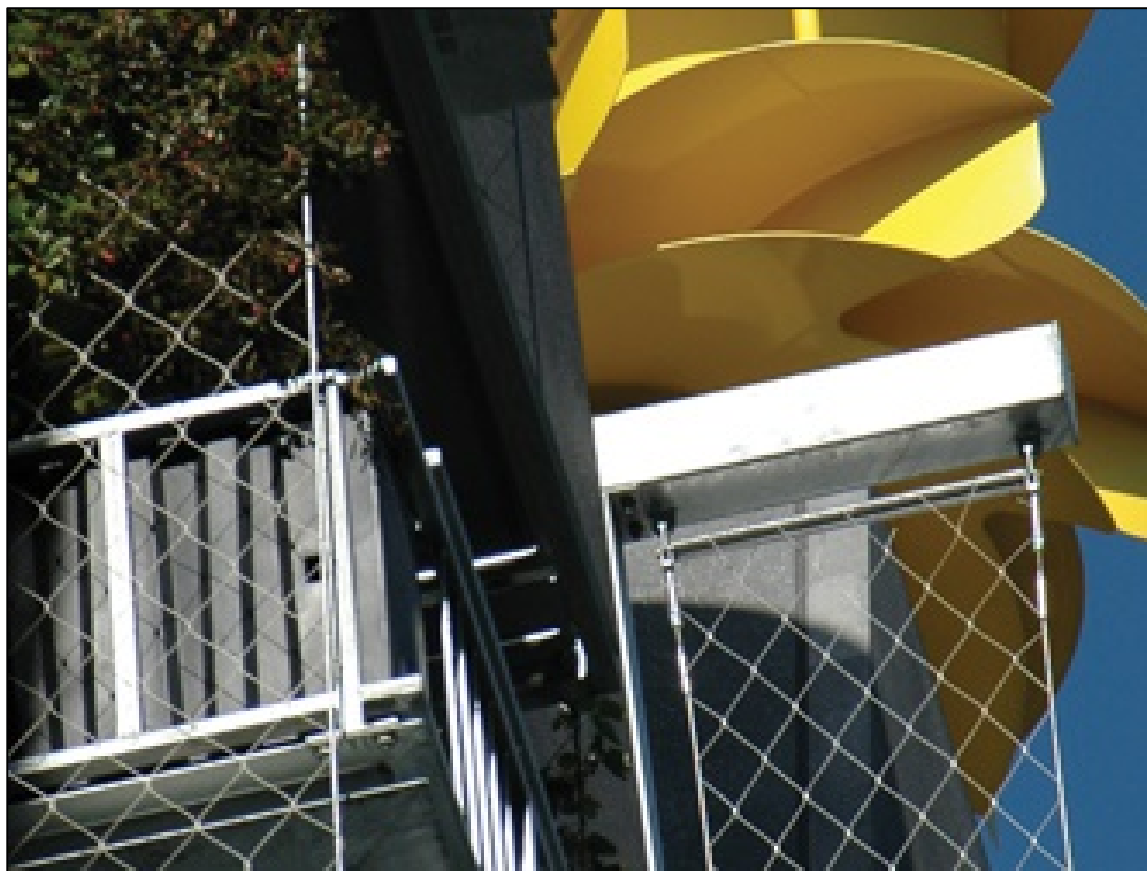
Murs végétalisés pour des immeubles d'habitation² (d'un prix abordable partout !)



Avantages :

- Isolation améliorée
- Atténuation du bruit
- Microclimat plus frais
- Plus de biodiversité
- Meilleure qualité de l'air (filtration des polluants)
- Esthétique
- Bien-être psychologique
- Retombées économiques et sociales positives

Câbles et ancrages en acier inoxydable



Murs végétalisés pour des immeubles d'habitation²

La réintroduction de « Mère Nature » dans un environnement de moins en moins naturel présente de si grands avantages que le gouvernement australien a créé le « Green Building Council » australien (GBA) pour prôner le développement durable dans l'immobilier.



Aménagement paysagé vertical

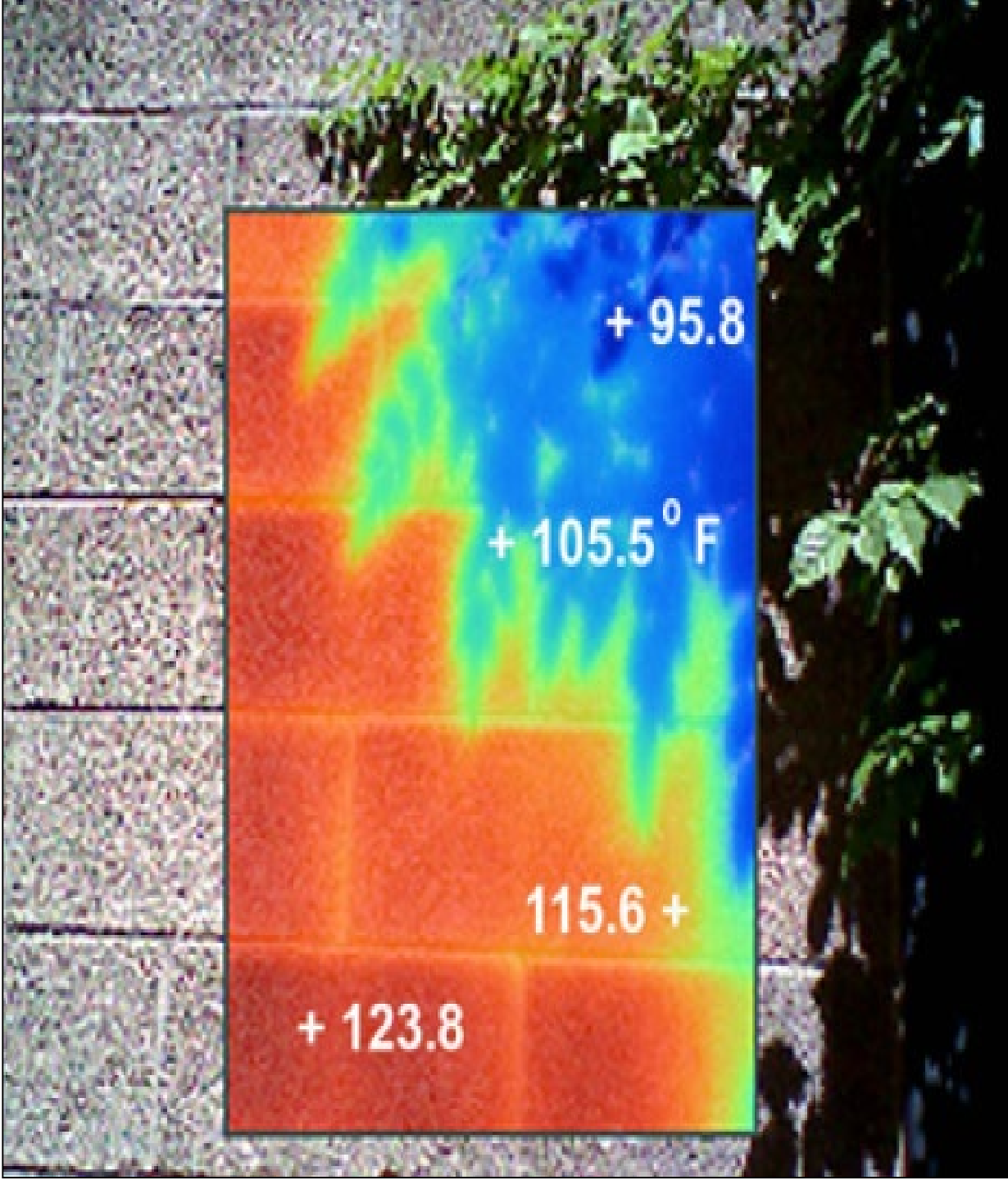
Bâtiment du Conseil Municipal de Melbourne : le système de palissage en acier inoxydable constitue la structure indispensable aux plantes grimpantes et transforme les surfaces qui stockent la chaleur en superbes jardins verticaux.





Mur végétalisé⁴

Photographie infrarouge montrant la température (en °F) de la surface du bâtiment, Tampa, Arizona, USA
Réf. 4.



Nouveau !



Ancrages et câbles


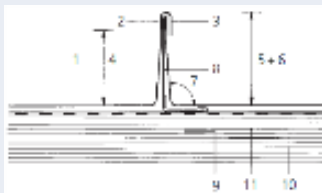
Les systèmes en acier inoxydable sont faciles à installer

Références « Murs végétalisés »

1. [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro Inox/VertGardens FR.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro%20Inox/VertGardens_FR.pdf)
2. <http://www.ronstantensilearch.com/melbourne-city-council-chambers-northern-green-facade/>
3. <http://www.jakob.co.uk/information/image-galleries/greenwall-systems-gallery/large-scale-greenwall-systems.html>
4. http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/11291/1/Price_umd_0117N_11876.pdf
5. <http://www.architectureartdesigns.com/30-incredible-green-walls/>

3. Toitures

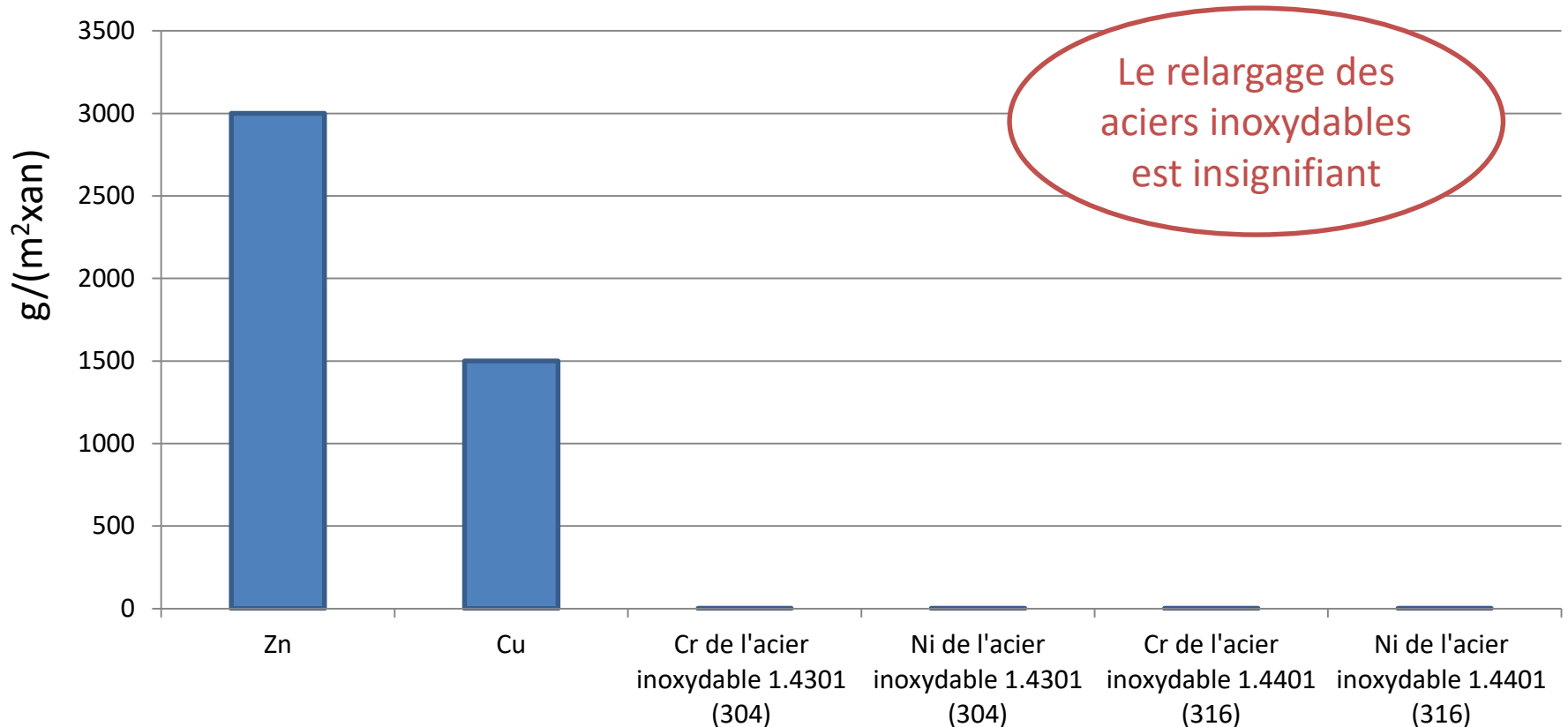
Caractéristiques courantes des toitures en acier inoxydable¹⁻⁴

	Inclinées (> 3 %)	Horizontales
Matériau	Ferritiques 1.4509, 1.4526 (bord de mer) & 1.4510	Austénitiques 1.4301, 1.4307, 1.4401 & 1.4404
Assemblage	Mécanique	Soudage (pour l'étanchéité à l'eau)
		 <ol style="list-style-type: none"> 1. Bande d'acier inoxydable 2. Cordon de soudure continu 3. Pli supérieur du joint debout 4. Hauteur du cordon de soudure ≈ 16 mm 5. Hauteur du joint avant pliage ≈ 30 mm 6. Hauteur du joint après pliage ≈ 20 mm 7. Angle d'environ 92° 8. Tasseau glissant 9. Fixation en acier inoxydable 10. Membrane de protection/acoustique 11. Structure porteuse
Finition de surface	Revêtement mat ou étamé (Sn)*	Mate ou 2B (lorsqu'il y a une couche supérieure)
Épaisseur	0,5 mm ; 0,4 mm pour l'évacuation des eaux de pluie. Autorise une structure légère	
Espérance de vie	Égale à celle du bâtiment	
Autres		Convient pour les toitures végétalisées En rénovation, peut être placé directement sur la couche de bitume

* Dans quelques régions, Cu ou Zn sont limités comme étant écotoxiques et lessivables par l'eau de pluie

Une nouvelle préoccupation, les métaux dans le ruissellement des eaux de pluie⁵

Principalement en Europe du Nord... Résulte des exigences croissantes de qualité, de disponibilité et de réutilisation de l'eau



La bibliothèque du Parlement de Delhi⁶⁻⁷

Architecte : Raj Rewal Associés

Nouveau !



1. A gauche : Vue d'ensemble avec le Parlement à l'arrière.

2. A droite : Vue du dôme central

La bibliothèque, $\approx 55,000 \text{ m}^2$, a une hauteur limitée pour ne pas cacher le Parlement lui-même. Le dôme central comprend un treillis de câbles et de tubes en acier inoxydable qui convergent à la clé vers un nœud moulé. Le deuxième dôme, réalisé avec des tubes en acier inoxydable et connu sous le nom de dôme VIP, mesure 16 m de diamètre et 2,5 m de haut.

Sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :¹

1. Toit d'une église en acier inoxydable , Leicester , GB
2. Restaurant scolaire, Oyonnax, France
3. Centre scientifique Universum, Brême, Allemagne





Pavillon des Émirats à l'exposition de Shanghai ⁸

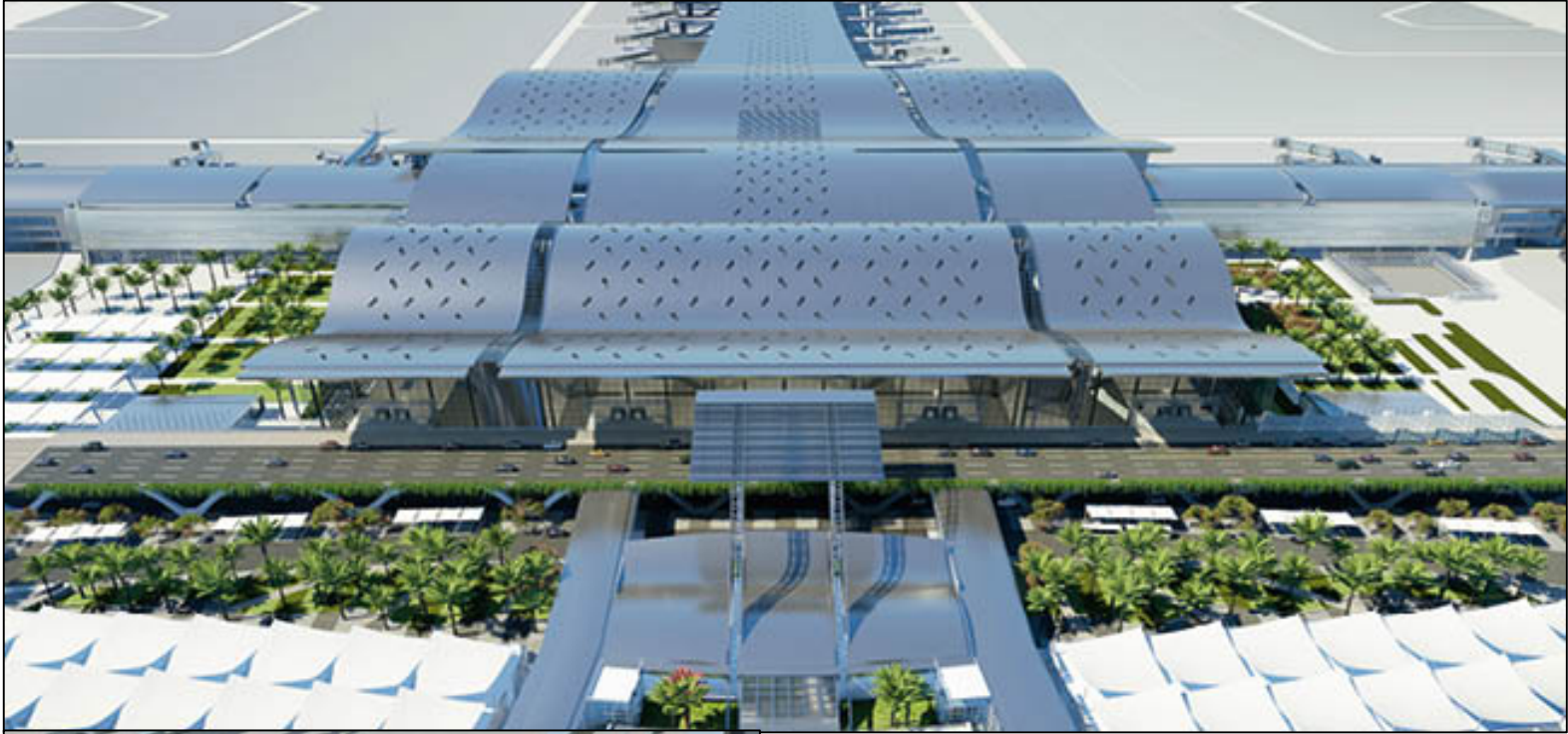
Architectes : Foster & Partners

La structure, en forme de dune, se compose de treillis triangulaires recouverts de panneaux en acier inoxydable. Elle a été conçue pour pouvoir être démontée.

Nouvel aéroport de Doha, Qatar⁹⁻¹⁰

Architectes : HOK

Nouveau !



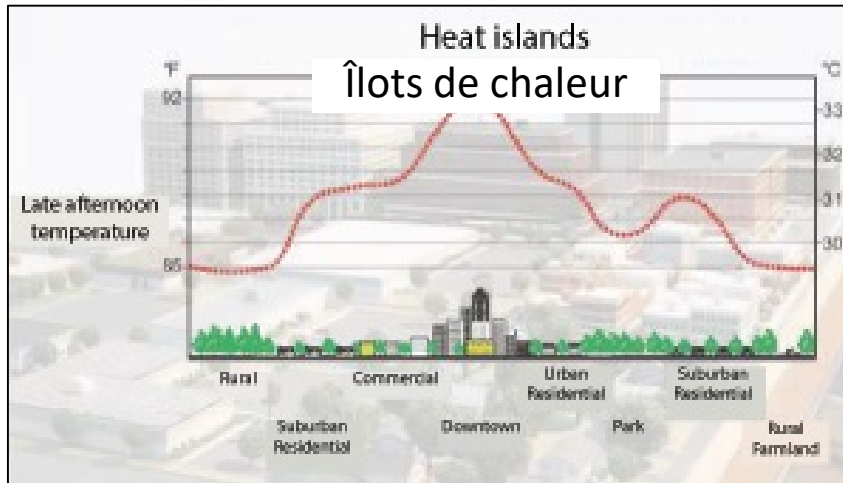
Cette toiture ondulée est considérée comme étant la plus grande en acier inoxydable au monde (195 000 m²).

Elle met en valeur une finition en acier inoxydable de texture uniforme, non directionnelle et faiblement brillante.

Une nuance « Lean duplex » a été choisie.

Aucun entretien n'est nécessaire.

Toitures végétalisées^{1-4, 11-12}



Avantages

- Atténuent les îlots de chaleur
- Réduisent les poussières
- Favorisent la biodiversité
- Améliorent l'isolation thermique
- Réduisent les risques d'inondation
- Atténuent le bruit
- Absorbent le CO₂
- Sont esthétiques
- Procurent un bien-être psychologique et des retombées positives sur les plans social et économique

Limites

- Exigent une structure robuste
- Demandent un bon savoir-faire
- Doivent être arrosées en été
- Exigent un peu d'entretien
- Sont plus chères

Toiture à haute réflectance

Hall Austin, Université d'État Sam Houston, Huntsville, Texas, USA (1851)
Toiture en acier inoxydable peu éblouissante* mais fortement réfléchissante^{11,13}

Les toitures à haute réflectance (Albédo) atténuent les îlots de chaleur urbains.
La réflectance est une propriété incluse dans le HQE**

SRI*** des finitions brevetées > 100



Produit	Élévation de température en °C (°F)	Indice de réflexion solaire (SRI)
Acier inoxydable nu	27 (48°F)	39-60
Acier galvanisé nu	30 (55°F)	46
Aluminium nu	27 (48°F)	56
Tous métaux, revêtement blanc	9 (16°F)	107
Tuile d'argile rouge	32 (58°F)	36
Tuile de béton rouge	39 (71°F)	17
Tuile de béton blanc	12 (21°F)	90
Asphalte, blanc générique	36 (64°F)	26
Asphalte, noir générique	46 (82°F)	1
Bardeau de bois marron	37 (67°F)	22
Bardeau de bois blanc	6 (10°F)	106

** en anglais LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

*** Indice de réflexion solaire (Solar Reflexion Index - SRI)

* La surface doit donner une réflexion diffuse de la lumière (c'est-à-dire éviter les réflexions de type miroir). Les surfaces poli miroir ne conviennent donc pas.



Brise-soleil¹⁵

Bâtiment de recherche médicale de l'Université d'Arizona & Bâtiment Thomas Keating

Ombrière de type auvent

Maillage à 43 % d'ouverture : optimise le compromis entre
l'atténuation du rayonnement solaire et la ventilation naturelle

Références « Toitures »

1. http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Roofing_FR.pdf
2. http://ssina.com/download_a_file/roofing.pdf
3. <https://youtu.be/ZQledV2QFRY>
4. <http://www.bssa.org.uk/cms/File/The%20Growing%20Market%20for%20Stainless%20Steel%20Roofing.pdf>
5. O. Wallinder and C. Leygraf ASTM Special Technical Publication N°1421, « Outdoor Atmospheric Corrosion » pp 185-199
6. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Structural/Parliament_Library_Building_Domes.pdf
7. http://www.architectureweek.com/2003/1022/design_1-3.html
8. <http://www.fosterandpartners.com/projects/uae-pavilion-shanghai-expo-2010/>
9. <http://www.hok.com/design/service/engineering/hamad-international-airport/>
10. <https://www.rigidized.com/exteriorscmt.php>
11. <http://www.stainlessindia.org/UploadPdf/Dec%202011%20wshop%20Part-I.pdf>
12. http://www.constructalia.com/repository/transfer/en/01921518ENLACE_PDF.pdf
13. <http://www.rigidized.com/saveenergy.php>
14. <http://www.stainlessindia.org/UploadPdf/Dec%202011%20wshop%20Part-I.pdf>
15. www.cambridgearchitectural.com/

4. Décoration

Sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

1. Escalier en bois et acier inoxydable (lieu inconnu)
2. Plafond incurvé en maille tissée (Université d'État de Louisiane)
3. Restaurant avec rideau de séparation transparent (Finlande)
4. Poignée de porte





Banque de France, Paris, France⁴
Architectes : Moatti & Rivière

EN 1.4301 (AISI 304) fini poli miroir



Station de métro El Carmel (L5), Barcelone, Espagne⁵

Panneaux muraux en tissé inoxydable



Monastère de Batalha, Portugal⁶

Rideaux en tissu d'acier inoxydable

Aire ouverte : 36 %.

Poids : 0,25 kg/m².

Diamètre des fils : 0,05 mm.

Espacement des fils : 0,13 x 0,13 mm.



Rideau intérieur & balustrade de sécurité⁷

Acier inoxydable

Aire ouverte : 44 %.

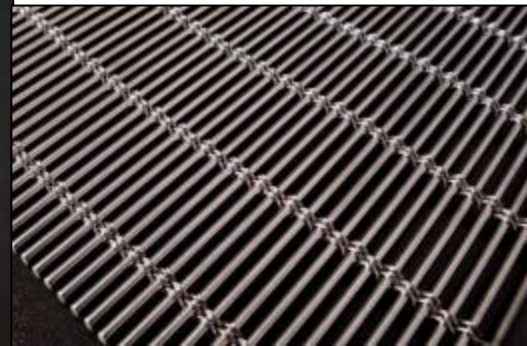
Poids : 5,2 kg/m².

Diamètre des câbles : 4 x 0,75 mm.

Diamètre des fils : 1,5 mm.

Espacement des câbles : 26,4 mm.

Espacement des fils : 3 mm.





Musée d'Art Contemporain & Centre d'expositions, Shenzhen, Chine⁸ (en construction)

Architecte : CoopHimmelB(l)au

Références « Décoration »

1. http://www.seoic.com/cable_railing.htm
2. <http://cambridgearchitectural.com/projects/louisiana-state-university-lsu-student-union-theater>
3. <http://www.twentinox.com/projects/item/36/Transparent+stainless+steel+curtain+panels>
4. <http://www.uginox.com/fr/node/180>
5. Source: <http://www.cedinox.es>
6. <http://www.archilovers.com/projects/58425/mosteiro-da-batalha.html>
7. http://www.theinoxincolor.com/portfolio_category/decorative-mesh-projects/
8. <http://www.coop-himmelblau.at/architecture/projects/museum-of-contemporary-art-planning-exhibition>

5. Tuyauteries en acier inoxydable



Dans le sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

1. Tuyauteries sanitaires
2. Emmanchement mécanique de tubes « press-fit »
3. Robinet de cuisine
4. Pomme de douche avec éclairage



Tuyauterie en acier inoxydable

Références

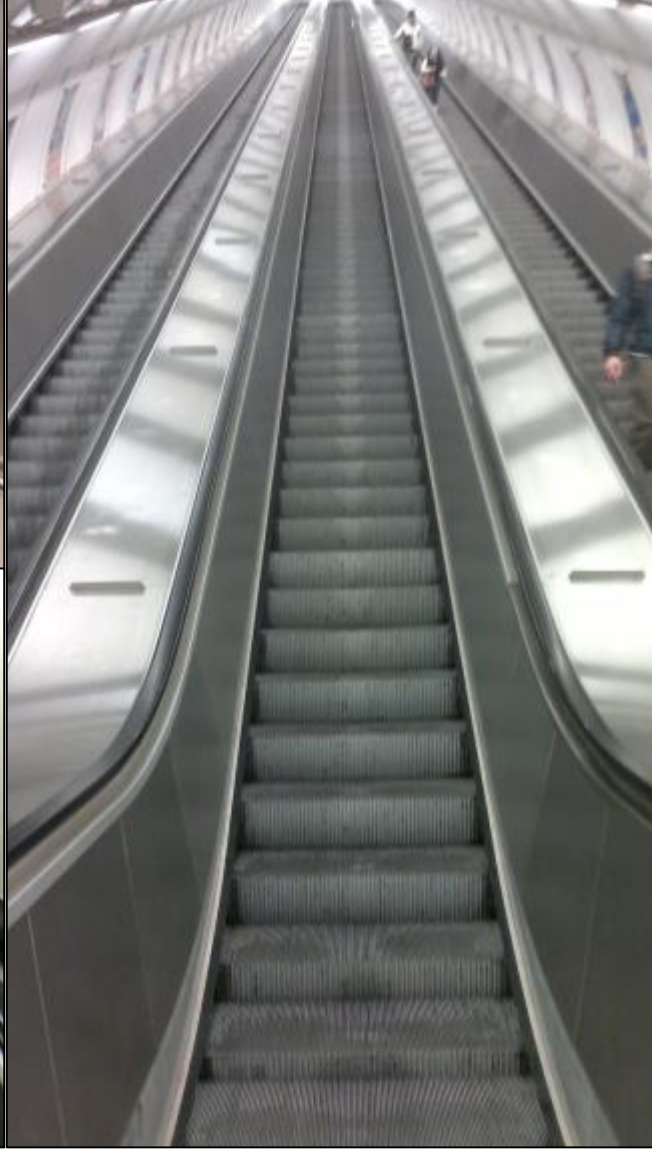
« Tuyauteries en acier inoxydable »

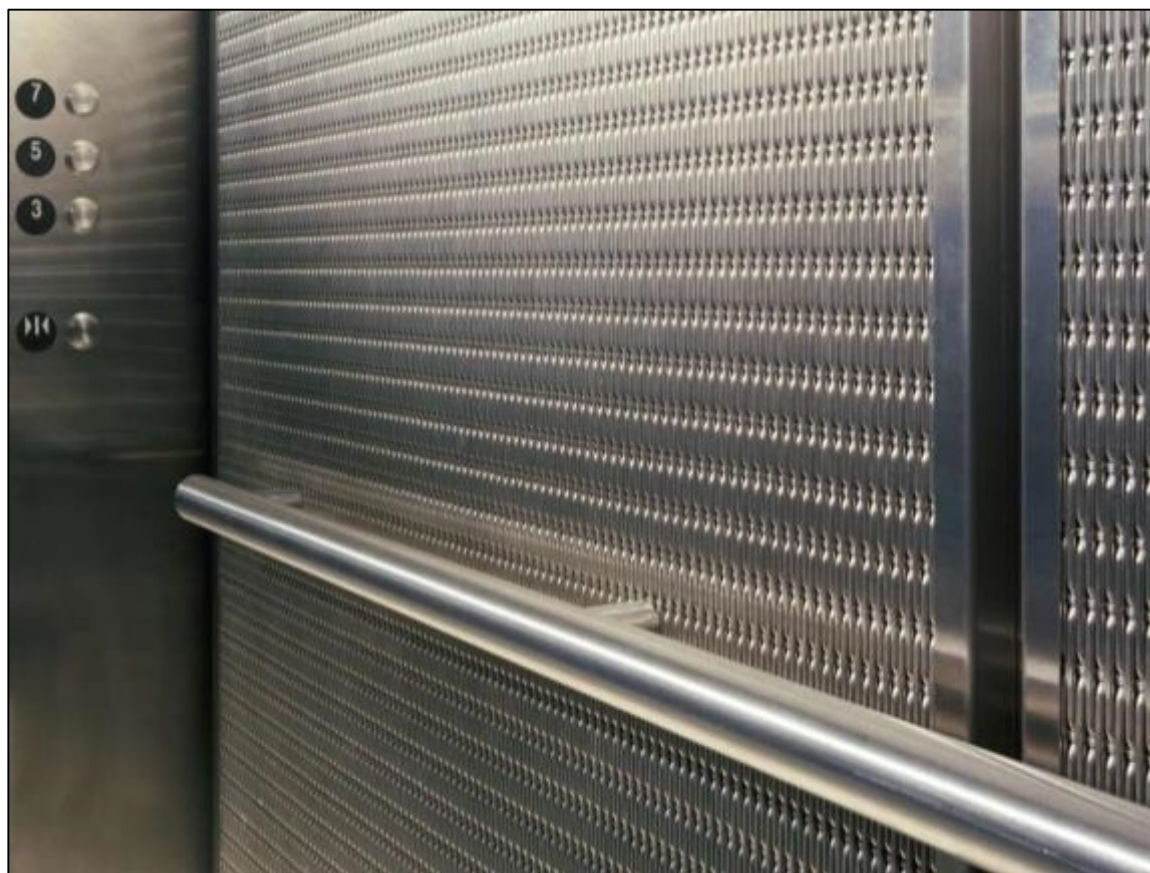
1. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro Inox/PressFittingSystems EN.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro%20Inox/PressFittingSystems%20EN.pdf)
2. [http://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/StainlessSteelPlumbing-color-EN 11019 .ashx](http://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/StainlessSteelPlumbing-color-EN%2011019%20.ashx)
3. https://nickelinstitute.org/library/?opt_perpage=20&opt_layout=grid&searchTerm=pipes%20for%20buildings&page=1
4. <http://www.bssa.org.uk/cms/File/BSSA%20PLUMBING%20P.1-4.pdf>
5. [https://www.grohe.de/de de/badezimmer.html](https://www.grohe.de/de_de/badezimmer.html)

6. Escaliers mécaniques et ascenseurs

Sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

1. Ascenseur (lieu inconnu)
2. Escalier mécanique (Métro de Prague)
3. Trottoir roulant (Métro de Bruxelles)





Ascenseur revêtu de mailles tissées³



Entrée de la station de métro Kraaiennest, Amsterdam, Pays-Bas⁴

Références

« Escaliers mécaniques et ascenseurs »

1. <https://www.forms-surfaces.com/elevator-ceilings>
2. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metro_bruelles_la_ufband.jpg
3. <http://cambridgearchitectural.com/projects/ft-lauderdale-hollywood-international-airport-rental-car-center>
4. <http://www.cabworks.com/>

7. Aéroports

Sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

1. Comptoir d'embarquement, balustrade et poubelle
2. Fontaine à eau potable
3. Comptoir du bar et repose-pieds



Sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

1. Tapis de livraison des bagages, aéroport de Manille, Philippines
2. Trottoir roulant, aéroport de Montréal, Canada
3. Filet de sécurité à l'aéroport de Copenhague, Danemark



Utilisations dans les Aéroports

Les aciers inoxydables sont très utiles dans les aéroports car ils permettent une utilisation 24 heures sur 24 toute l'année, tout en maintenant une esthétique excellente. Voici quelques applications:

- Mobilier
- Comptoirs
- Fontaines
- Cloisons
- Ventilation
- Rambardes
- Ascenseurs, escalators et trottoirs mobiles
- Carroussel de livraisons des bagages
- Chariots
- Toits
- Fixations, etc ...

8. Mobilier urbain



Dans le sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

1. Barrière près d'une école à Budang, Corée. Nuances : STS439 / STS304 Finition: 2B / HL / poli
2. Main courante à Gijón, Espagne. Nuance : 316L Finition : Poli
3. Main courante, Inde
4. Gare du métro South Ferry à Manhattan « See it split, see it change » de Doug et Mike Starn



Sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

1. Banc à Paulinia (São Paulo), Brésil. Nuance : 304 STS304, finition satinée
2. Banc papillon à San Luis Potosi, Mexique
3. Banc avec maille tissée, France
4. Candélabre, Séoul, Corée. Nuances : STS439 / STS304 / STS304N1, finition : 2B / BA / Poli



Sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

1. Arrêt de bus, Istanbul, Turquie. Nuances : AISI 304 et AISI 316, finition : 2B / BA / Brossé / Scotch-Brite
2. Porte-vélo, Albenga, Italie. Nuance : EN 1.4301 (AISI 304)
3. Sculpture « Invisible City », Wellington, Nouvelle Zélande
4. Sculpture de Joana Vasconcelos intitulée « Maryline » et faite de faitouts en acier inoxydable



Références « Mobilier urbain »

1. <https://www.worldstainless.org/applications/architecture-building-and-construction-applications/street-furniture/>
2. http://norcor.free.fr/piazza_superbe_inox.jpg
3. <http://listraveltips.com/wellington-street-art-stainless-steel-braille-sculpture/>

9. Rénovation



A gauche : Entrée en acier inoxydable du pavillon de la crypte de l'église St-Martin-in-the-Field, Londres

A droite : Acier inoxydable et verre de la Pyramide du Louvre, Paris



Théâtre-opéra de Vérone, Italie

Le grand monument romain, dont la construction remonte à la première moitié du 1^{er} siècle après J.-C., est connu comme étant le plus important théâtre en plein air. Des travaux de restauration récents comprennent la construction d'une nouvelle couverture pour la fosse centrale, là où s'installe l'orchestre, la salle souterraine et les tunnels des égouts. La nouvelle dalle de couverture est supportée par un système de bracons et de tirants post-tendus. Le système de post-tension utilisé, comprenant des barres en acier inoxydable, garantit la sécurité, la qualité et la durabilité de la structure.



Théâtre romain, Fréjus, France

Restauration du théâtre romain de plein air en teck et tôles perforées en acier inoxydable EN 1.4571 d'épaisseur 3 mm.



Références « Rénovation »

1. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro Inox/New meets Old FR.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro%20Inox/New%20meets%20Old%20FR.pdf)

10. Stades

Sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :¹⁻³

1. Main courante dans les escaliers de l'entrée VIP, Wembley, GB ; 2. Tourniquet ;
3. Vestiaires ; 4. Auvent et garde-corps en acier inoxydable sur la passerelle sur la rue Bourke au stade Colonial de Melbourne, Australie





Stade Yamuna, Delhi, Inde ⁴
Architectes : Peddle Thorb

A l'occasion des jeux du Commonwealth en 2010, un stade multifonction a été construit à New Delhi. Avec sa façade brillante faite de mailles en acier inoxydable, le stade, moderne et durable, symbolise le sport en tant que vecteur d'interaction entre les hommes. Le bardage en acier inoxydable tissé avec un taux d'ouverture de 53 % protège les spectateurs du climat subtropical pénible et offre une protection solaire efficace.



Stade Castelão, Fortaleza, Brésil^{5,6}

Architecte : Vigliecca & Associés

La façade a été entièrement réalisée en acier inoxydable déployé. En plus de la structure extérieure, l'acier inoxydable a été utilisé pour les balustrades, les mains-courantes des zones VIP, les toilettes et les vestiaires du stade. « Nous avons choisi cette option pour la durabilité qu'offre l'acier inoxydable, ce qui est essentiel pour des surfaces comme la façade qui exigent un matériau résistant à la corrosion, et pour son apparence noble, indispensable dans la zone d'accueil » a déclaré l'architecte Ronald Fiedler, responsable du projet.



Stade Allianz Park Palmeiras, Sao Paulo, Brésil⁷

Architecte : Edo Rocha Architecture

C'est l'un des plus beaux stades du monde. L'acier inoxydable est utilisé de manière intensive pour la façade. Les tôles perforées en acier inoxydable facilitent la circulation de l'air.



Façade « Média » du stade Pierre Mauroy, Lille, France⁸

Architectes : Valode & Pistre et Ferret

Maille tissée en acier inoxydable pour la façade « Média ».

Les mailles supportent un système de LED polyvalentes de forte puissance qui permettent des effets lumineux programmables individuellement allant des graphiques simples à la projection de vidéos.

Références « Stades »

1. http://www.cmf.co.uk/products/products.asp?id=92&product_id=4
2. <http://www.assda.asn.au/blog/223-stainless-welcome-for-sports-fans>
3. <http://www.controlledaccess.com/>
4. <https://gkd-india.com/metalfabrics/yamuna-sports-stadium>
5. <http://www.vigliecca.com.br/en/projects/castelao-arena#gallery;%20>
6. <http://www.copa2014.gov.br/en/noticia/see-details-castelaos-architecture-project>
7. <http://edorocha.com.br/portfolio/allianz-parque/>
8. <https://www.osram.com/ls/projects/grand-stade-lille/index.jsp>

11. Piscines

Sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche :

1. Piscine olympique, liner en acier inoxydable, Vichy, France
2. Spa personnalisé en acier inoxydable
3. Rampes en acier inoxydable





Toboggan inox

Sur ce toboggan d'une forme élégante et profilée, les marches permettant accéder au sommet se trouvent dans le pied. La glissoire s'évase et vire à gauche.

Pour créer un contraste, les concepteurs ont choisi un fini poli miroir à l'intérieur et un aspect brossé à l'extérieur.

« L'inox poli ne devient jamais trop chaud au toucher, même dans les climats chauds » expliquent les concepteurs britanniques. *« En fait il réfléchit la lumière du soleil et la chaleur car il ne s'oxyde pas à la différence des autres métaux »*

Références « Piscines »

1. <http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/french-pool-liner-article.php>
2. http://www.constructalia.com/repository/transfer/fr/02163065ENLACE_PDF.pdf
3. <http://www.awt-eisleben.de/en/swimming-pools-136.html>

Merci!

Testez vos connaissances sur l'inox ici:

<https://www.surveymonkey.com/r/3BVK2X6>

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

Module 02B: **Applications: Infrastructure**

Sommaire

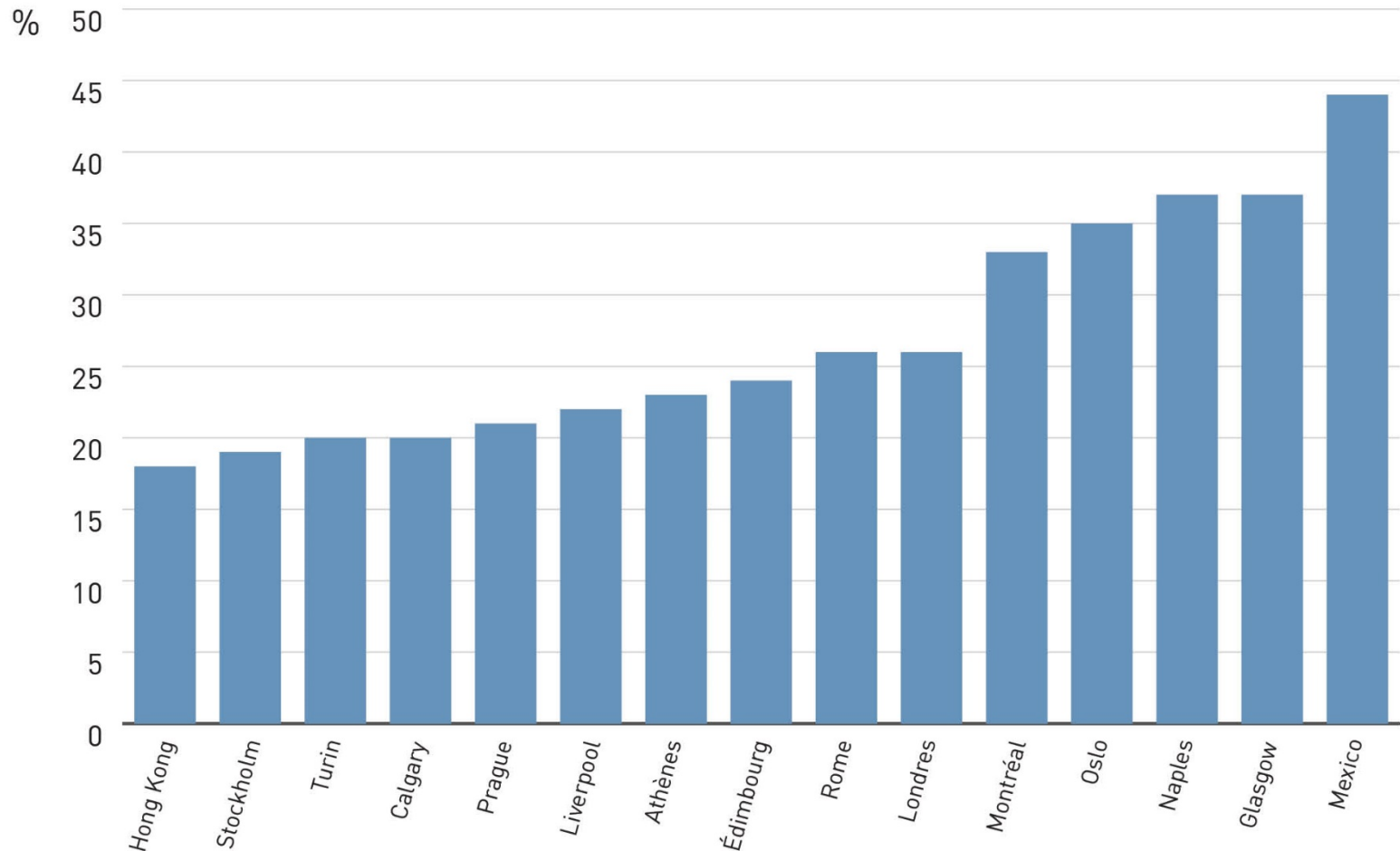
1. Réseaux d'eau potable
2. Ponts
3. Infrastructures côtières

1. Réseaux de distribution d'eau

Pourquoi utilise t'on les aciers inox?

- Faible pertes par fuites: Les inox ne développent pas de corrosion uniforme comme c'est le cas pour la fonte ou l'acier, corrosion qui peut conduire à la rupture des canalisations. Les vannes inox ne se grippent pas. Moyennant une conception appropriée, les tuyauteries inox fonctionnent sans risque dans les zones sismiques
- Hygiéniques : Les inox sont inertes vis-à-vis de l'eau potable et conservent ainsi la qualité de l'eau
- Durée de vie étendue: Les installations inox peuvent fonctionner 100 ans grâce à leur excellente résistance à la corrosion. Les inox résistent à la corrosion dans la plupart des sols et ne nécessitent pas de revêtement ou de protection électrochimique
- Recyclable : A la différence des canalisations en ciment ou non-métalliques, les inox se recyclent très facilement et leur teneur en éléments d'alliage a de la valeur.
- L'inox est utilisé pour des réservoirs d'eau potable de grande capacité, neufs ou en rénovation.

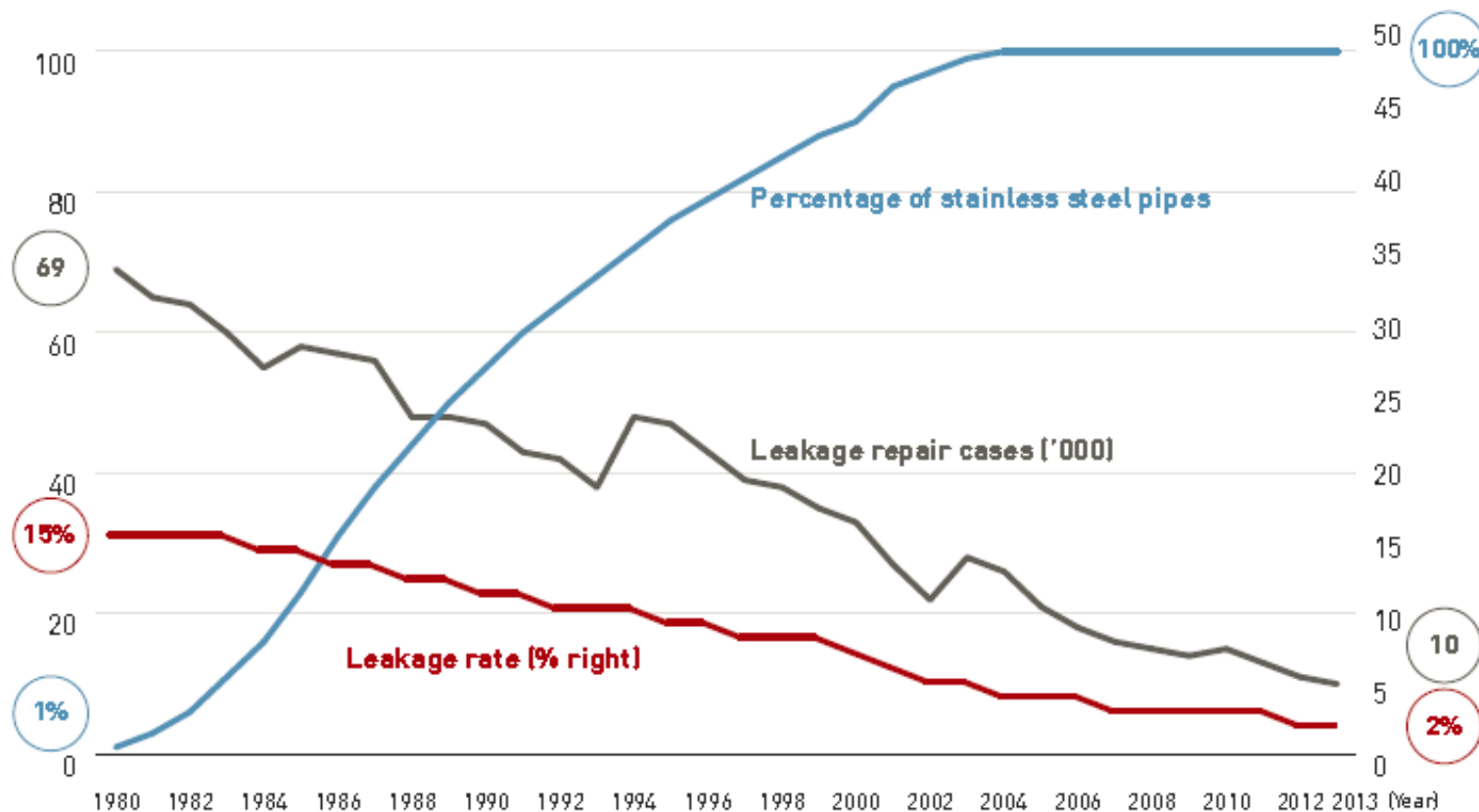
Taux de perte en eau de quelques métropoles (2014) ⁸



Taux de fuite dans certaines grandes villes
Source : OCDE (Water Governance in Cities, 2014)

Reduction des fuites d'eau du réseau de distribution à Tokyo associée à l'utilisation d'acier inoxydable¹

Reduction of leakage

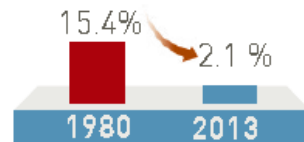


Reduction of water leakage with the replacement of old water pipes with stainless steel ⁸

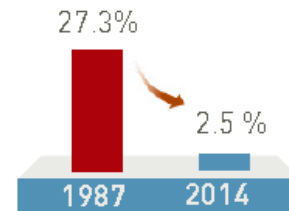
Results of the projects in Tokyo, Seoul and Taipei



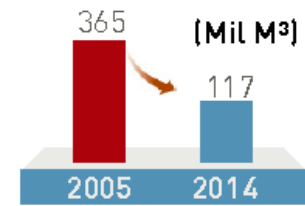
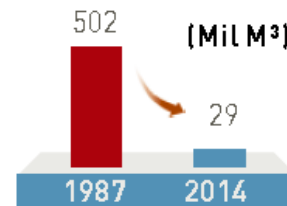
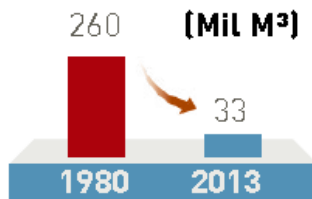
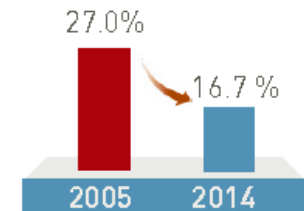
Tokyo

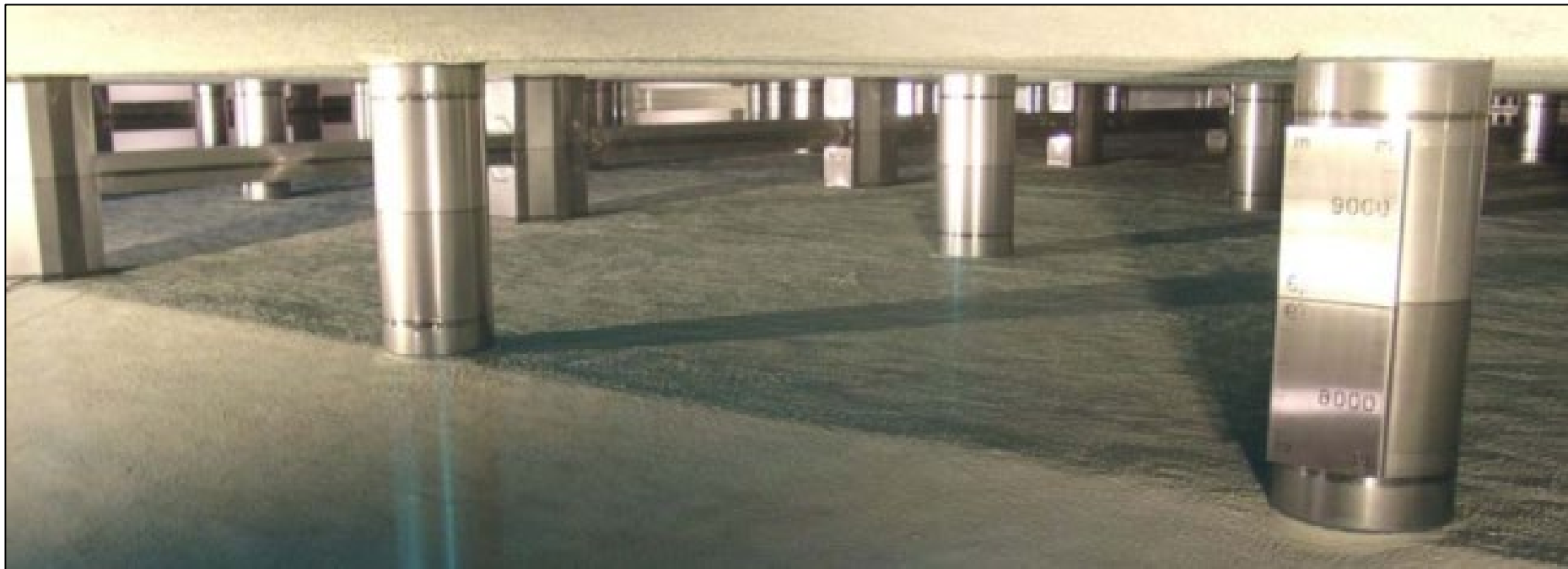
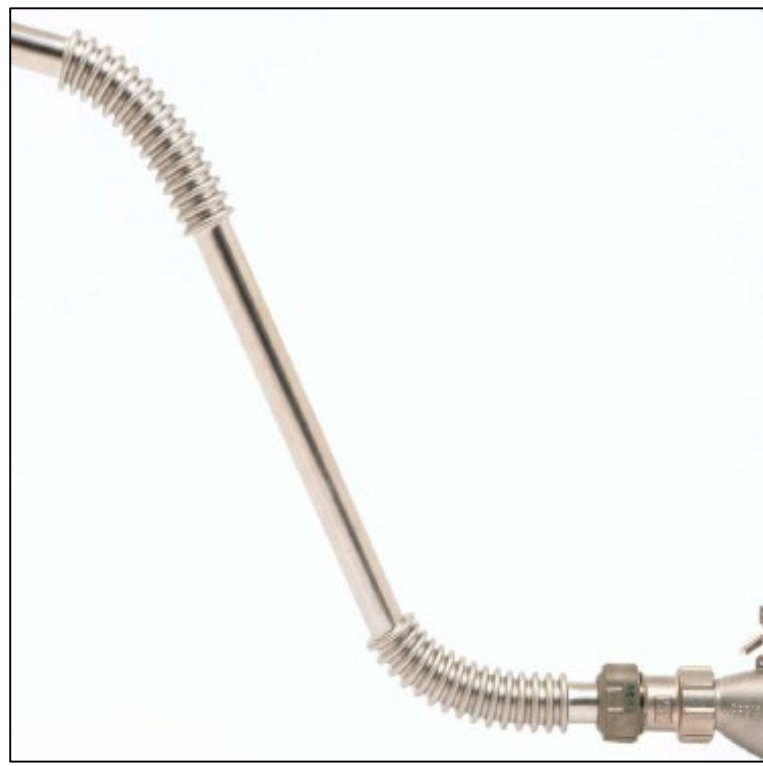


Seoul



Taipei







Réservoir d'eau avant réparation, Gangneung-City, Corée⁹

- La corrosion et la détérioration du béton sont visibles sur l'image et sont la cause des fuites.
- Le revêtement époxy n'a pas été retenu car non durable. Le choix de l'inox pour la rénovation a été motivé par sa résistance à la corrosion, sa durabilité, l'absence d'entretien et l'absence de prolifération bactérienne.



AVANT

Le même après installation du nouveau revêtement inox

- Acier inox ,
nuances duplex
STS329LD et
STS329J3L
- Les panneaux
sont assemblés
par soudage et
ancrés dans le
béton



APRES

Références « Réseaux de distribution d'eau »

1. <http://www.nickelinstitute.org/en/NickelUseInSociety/MaterialsSelectionAndUse/Water/Distribution.aspx>
2. http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Stainless_Steel_Pipe.pdf
3. <http://www.worldstainless.org/news/show/246>
4. <http://worldstainless.org/news/show/2140>
5. Source: POSCO, Korea (<http://www.posco.com>)
6. http://www.worldstainless.org/Files/ISSF/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Drinking_Water_Supply.pdf
7. http://worldstainless.org/applications_protection_environment_and_human_health/water
8. http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/CorrResist_SoilsConcrete_EN.pdf
9. https://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/FieldCorrosionResistanceTestOnStStPipingForBuildingService_12012_.pdf
10. http://worldstainless.org/applications_protection_environment_and_human_health/water -

Nouveau!

2. Les ponts

Nouveau!

Beaucoup de ponts sont en mauvais état

- Beaucoup d'entre eux ont été construits après la 2^{ème} guerre mondiale
- Pour une durée de vie n'excédant guère 60 ans
- La circulation a été plus dense que prévu
- On a fréquemment lésiné sur ou reporté les dépenses d'entretien

Nouveau!

Les ponts s'écroulent rarement, heureusement!



Cette catastrophe a déclenché des évaluations de l'état des ponts dans de nombreux pays

- Le pont autoroutier Morandi à Gênes a été inauguré le 4/09/1967.
- C'est un pont à travées multiples, partiellement suspendu, en béton précontraint.
- Le 14/8/2018 le pilier ouest s'écroule par mauvais temps, entraînant une partie du tablier et les véhicules avec, tuant 43 personnes.

Nouveau!

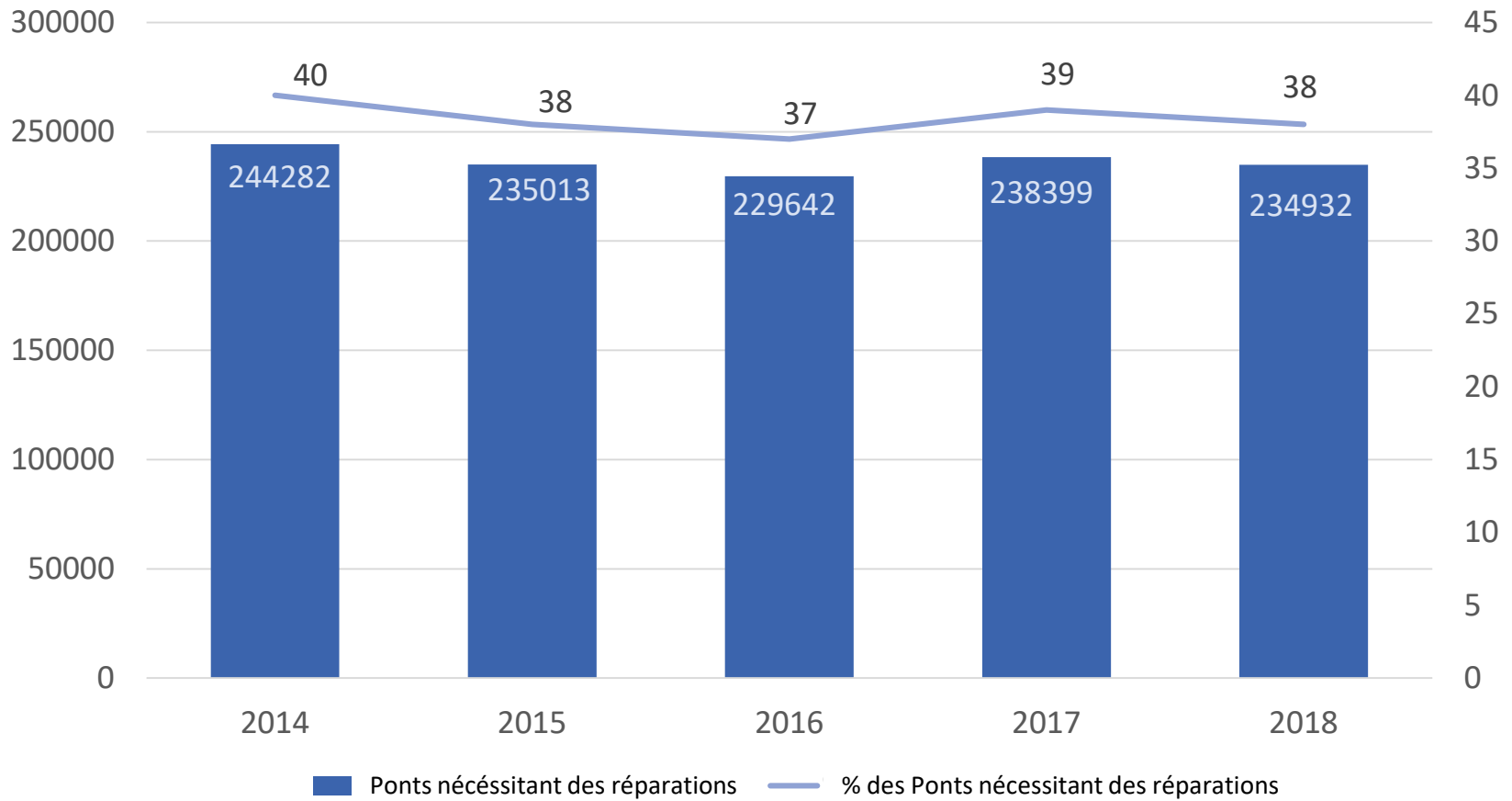
Etat des ponts dans l'Union Européenne

- Pas de rapport global disponible
- Situation qui varie d'un pays à l'autre
- Allemagne: 12.5% des ponts autoroutiers sont en bon état, 12.4% en mauvais état
- France: un rapport récent a conclu que un pont sur trois est en mauvais état
- etc...

Situation aux USA

Nombre de ponts qu'il faudrait remplacer ou réparer

Nouveau!



Nouveau!

L'acier inoxydable dans les ponts

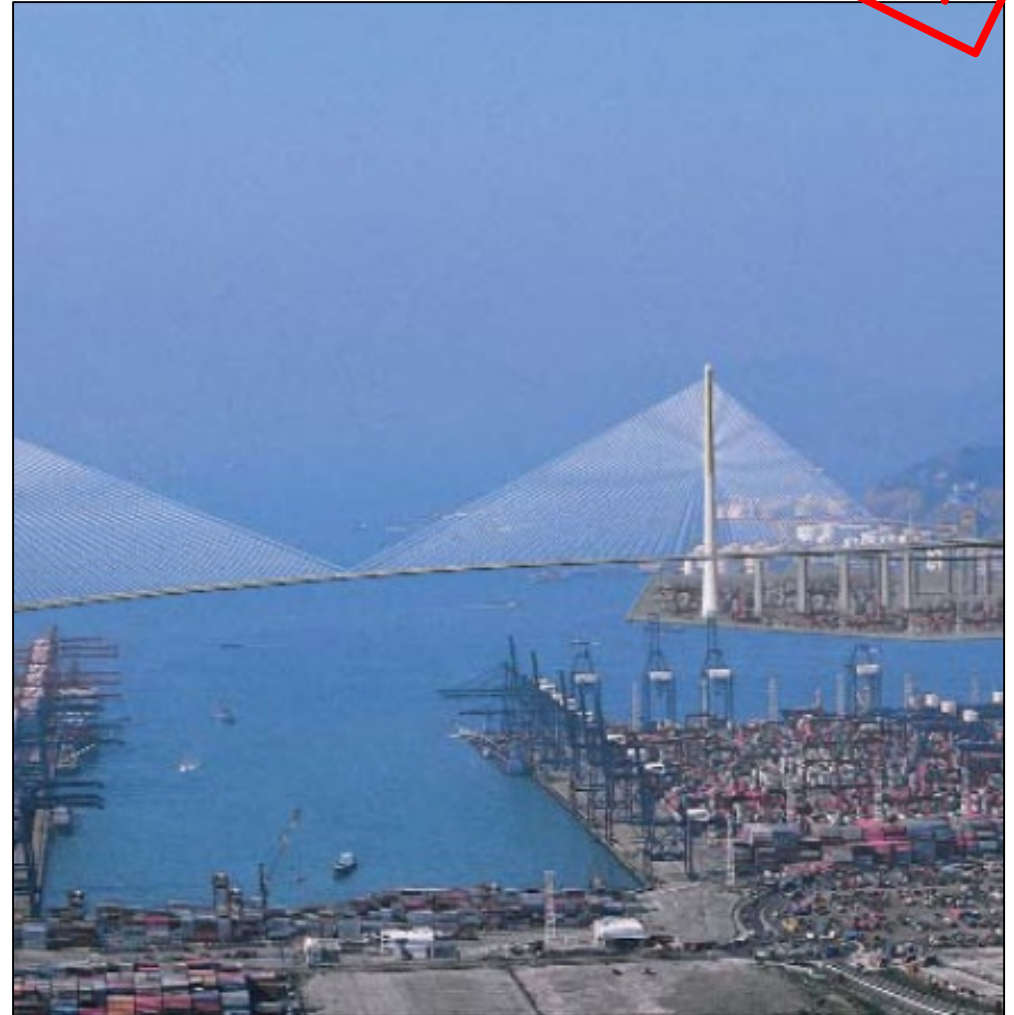
Quelques exemples

Stonecutter's (2009) Hong Kong

Ce pont célèbre situé en zone urbaine a été conçu pour une durée de vie de 120 ans dans des conditions difficiles: une circulation intense, un climat tropical, de la pollution urbaine, du brouillard salin, du vent, des typhons, des chocs accidentels causes par des navires et enfin des impacts sismiques.

Lors de son inauguration ce fut le premier pont à haubans d'une portée dépassant 1km.

L'acier inoxydable austéno-ferritique UNS S32205 (EN1.4462) a été utilisé comme "peau" autour du béton pour la partie supérieure des pylônes, pour l'ancrage des cables et pour le renforcement du béton des fondations et de la partie inférieure des pylônes.



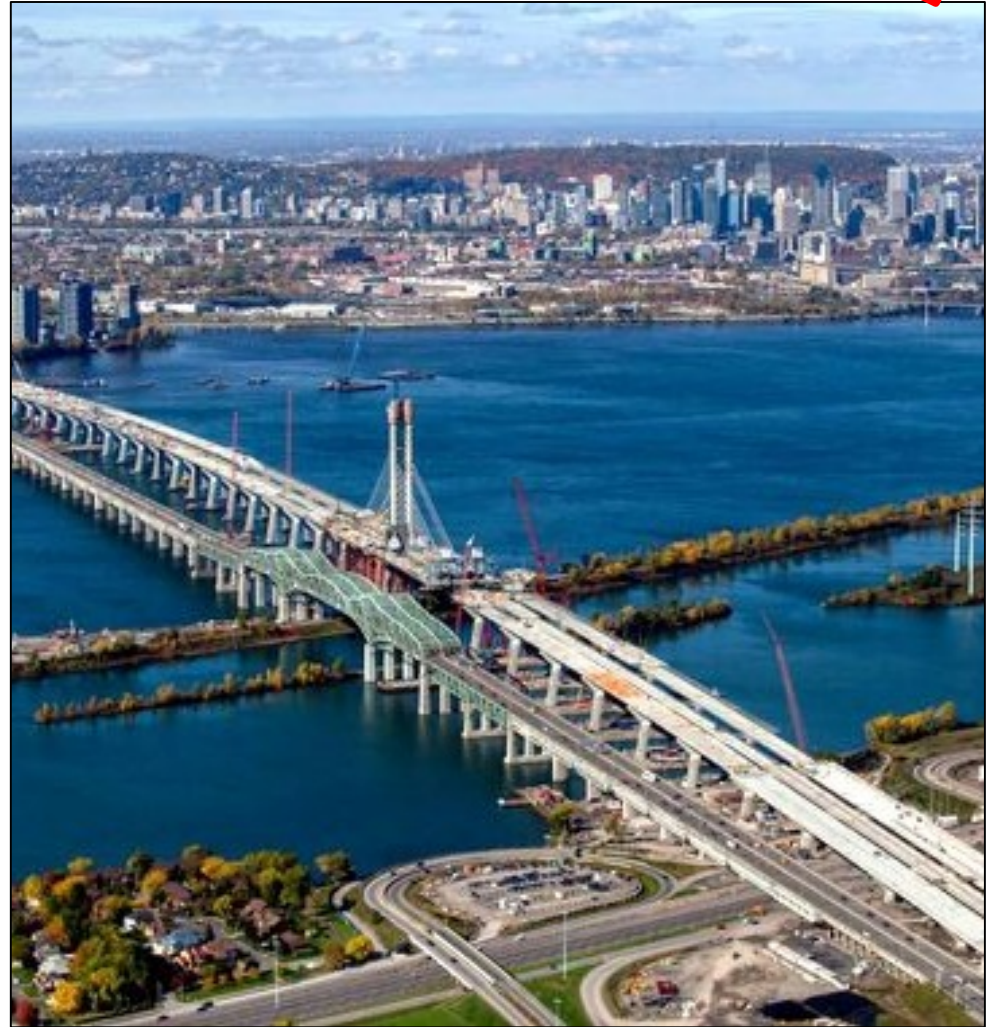
Nouveau!

Champlain (2019), Montreal

Nouveau!

Le nouveau pont de 3,4km qui enjambe le fleuve St Laurent et la voie maritime remplace l'ancien qui, corrodé, menaçait de s'effondrer. Il a été conçu pour résister à des cycles gel/dégel et à des températures de -25 à +30°C. C'est un pont à la fois autoroutier (plus de 50 millions de véhicules par an), ferroviaire (pour un train de banlieue), et pour cyclistes et flâneurs car il prévoit même des espaces pour admirer le paysage.

Plus de 15000T d'inox austéno-ferritique S32305 (EN1.4362) ont été utilisées dans les zones critiques de la structure. L'ancien pont date de 1962 et l'a pas pu être conservé malgré des réparations coûteuses. Le nouveau pont a coûté 4200 Millions CAD, plus 400 Millions CAD pour la déconstruction de l'ancien pont.

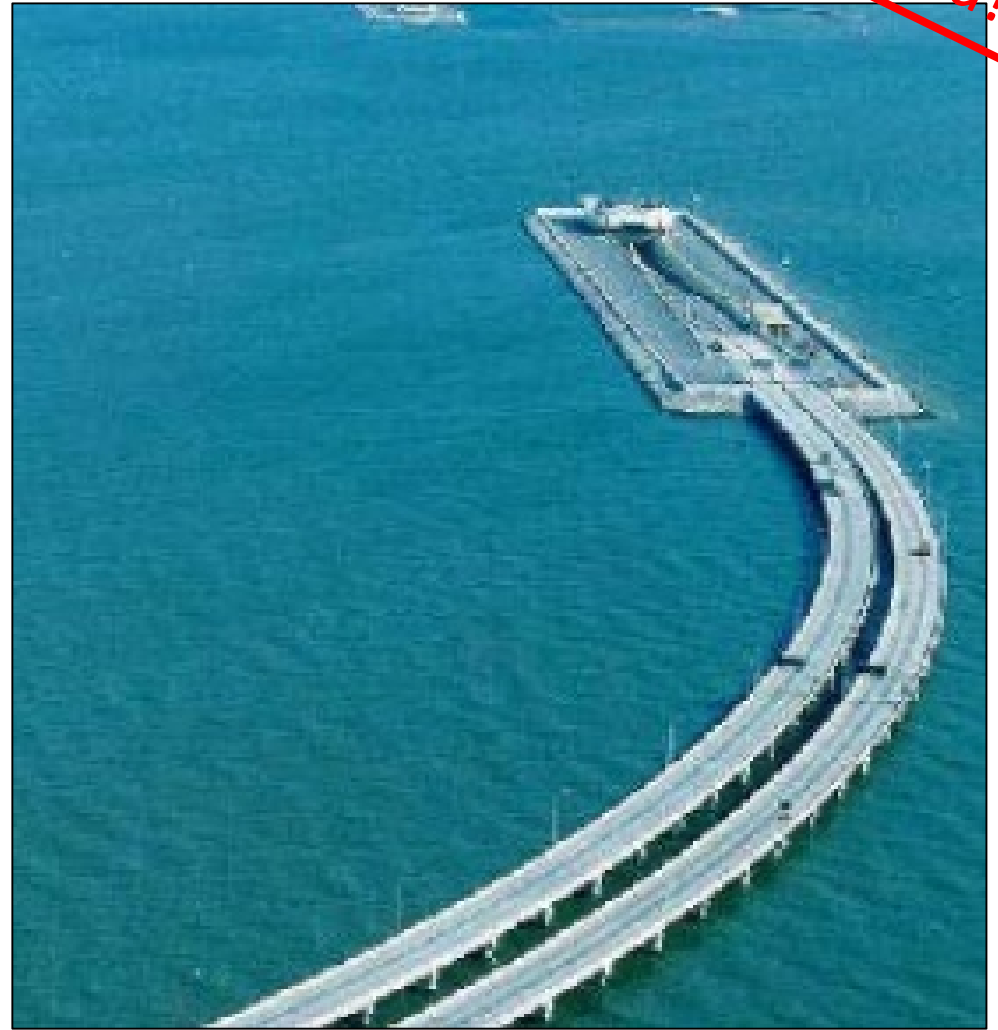


Hong Kong, Zhuhai, Macau (2018)

Le pont fait partie d'un ensemble de 50km de long constitué de trois ponts à haubans, d'un tunnel sous marin de 6,7km et de trois îles artificielles.

Sa construction a duré 9 ans et il a coûté 20 milliards de dollars.

Il a été conçu pour durer 100 ans et dans ce but 10 000T d'inox ont été utilisés.



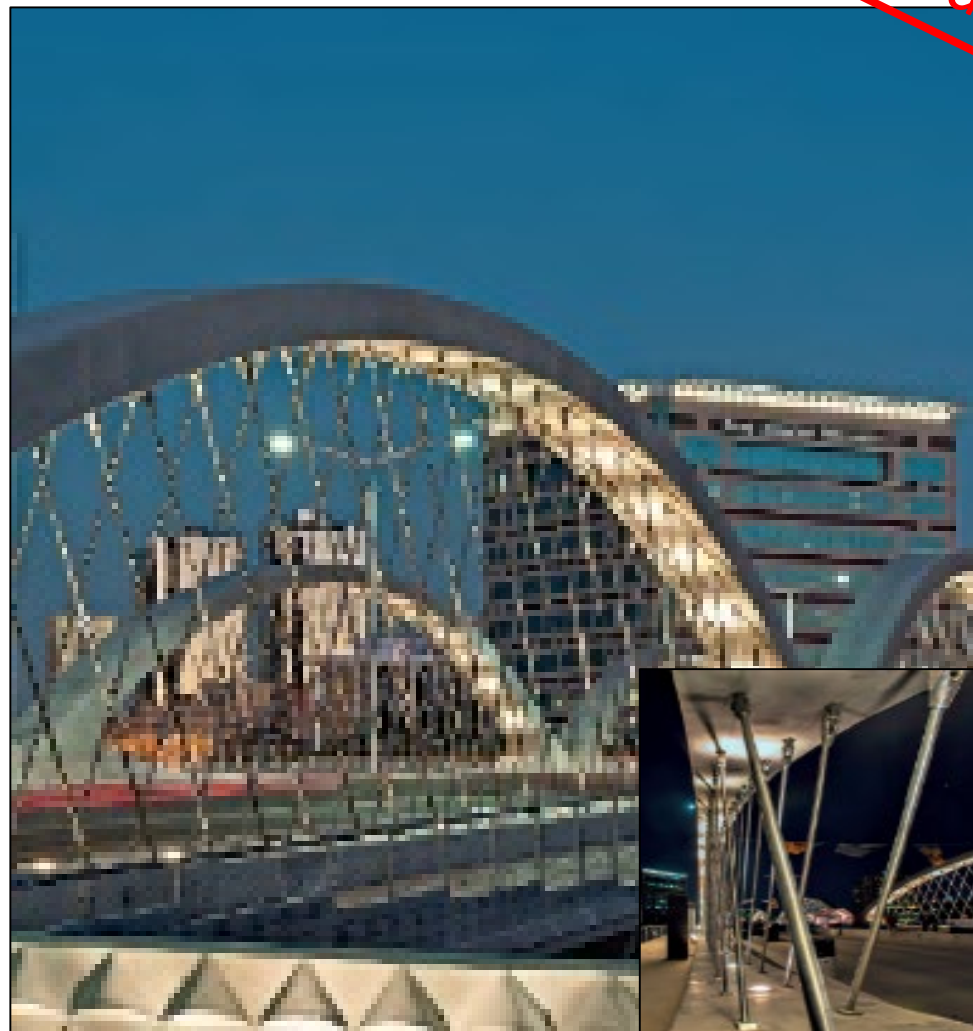
Nouveau!

Fort Worth, Texas (2013)

C'est le premier pont au monde à arches "bow string" utilisant des éléments préfabriqués (12 au total).

La conception est également très innovante car les tirants qui connectent les arches au tablier sont inclinés ce qui accroît la stabilité et la performance de la structure.

L'acier inox austéno-ferritique S32205 (EN1.4462) utilisé pour les tirants a permis une conception efficace, élégante et durable.



Nouveau!

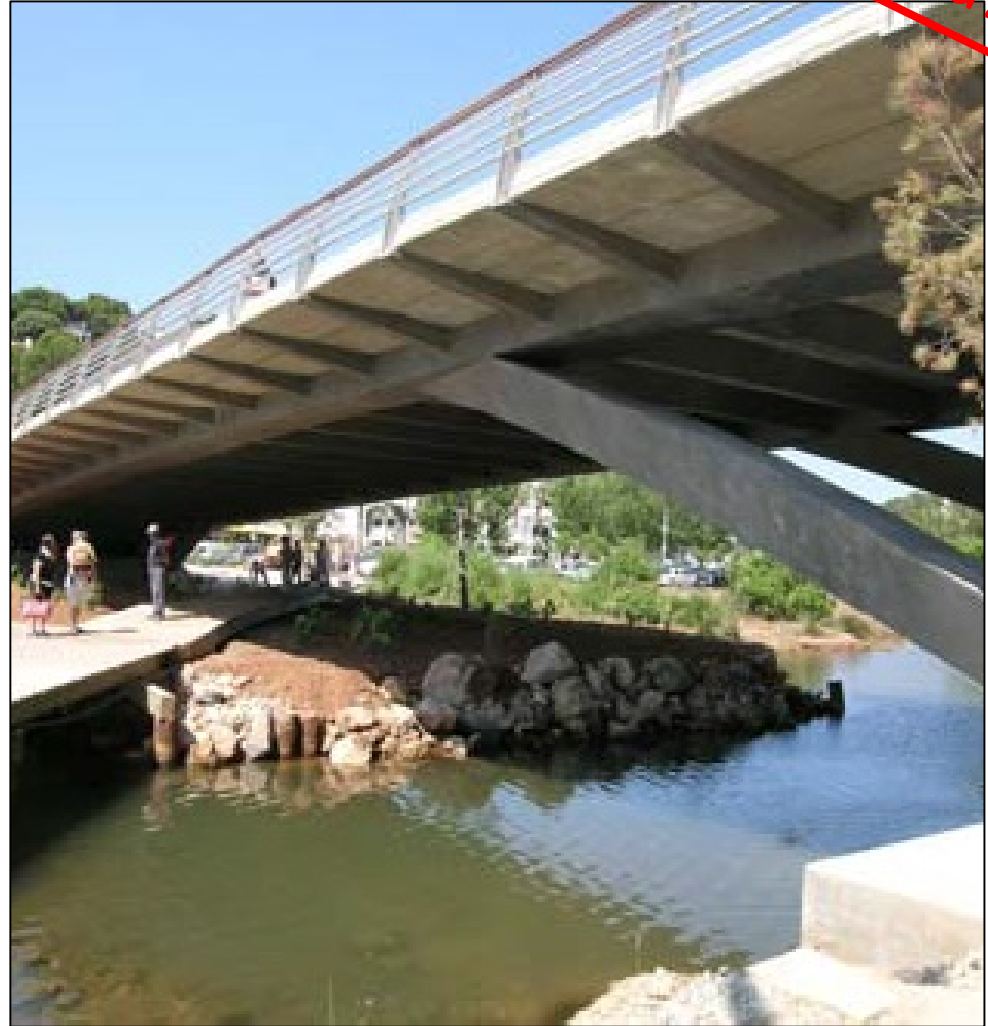
Nouveau!

Cala Galdana, Menorca (2005)

Ce pont en inox remplace un pont en béton armé d'acier au carbone.

L'acier inox duplex S32205 (EN1.4462) a été choisi pour son excellente résistance à la corrosion et ses caractéristiques mécaniques.

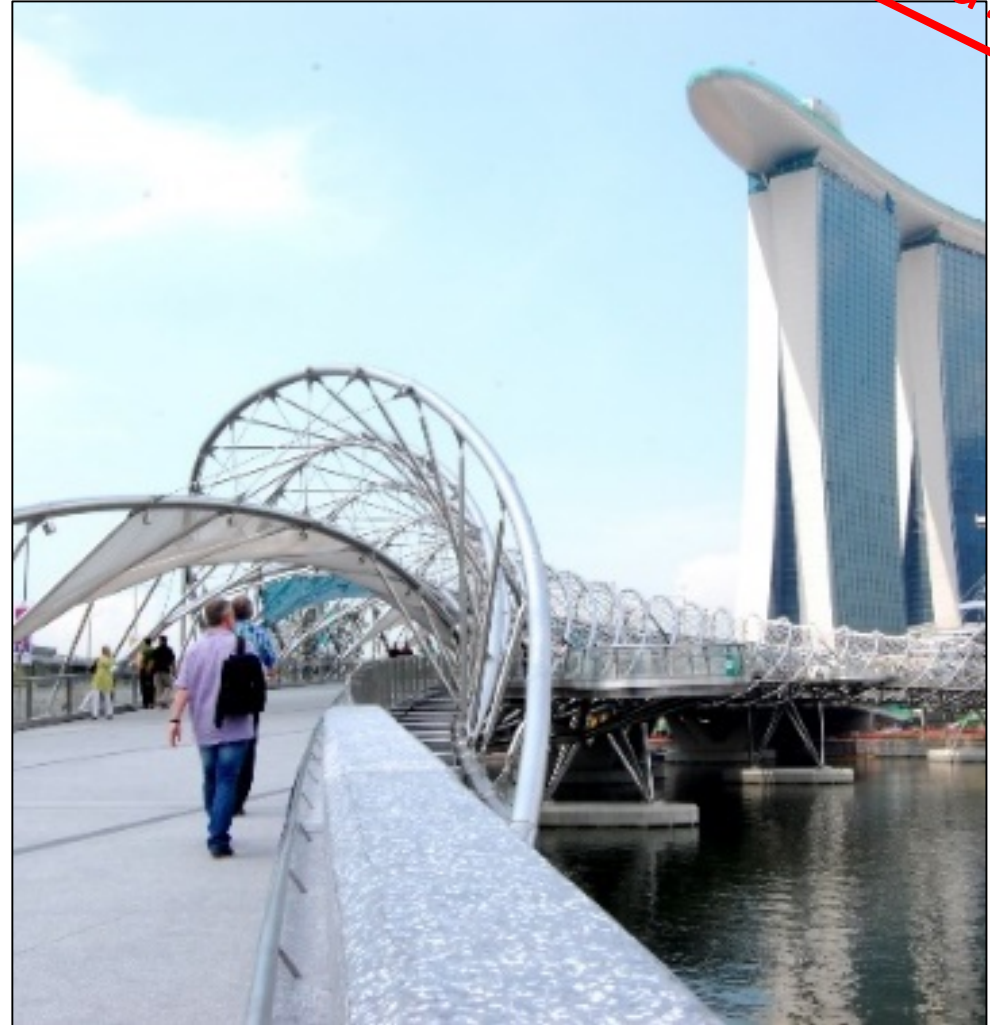
La limite élastique $R_{p_{0,2}}$ minimale imposée était de 460MPa, pour une valeur mesurée de 535MPa, alors que la valeur minimale pour l'acier carbone n'était que de 355MPa.



Helix, Singapore

La structure unique en double hélice de cette passerelle de 280m de long est constituée de tubes et de plaques en inox duplex S32205 (EN1.4462). Cette nuance a été choisie pour ses hautes caractéristiques mécaniques et sa résistance à la corrosion dans un climat tropical maritime. Le coût de possession (LCC) de cette passerelle inox sera inférieur à celui d'une passerelle en acier au carbone.

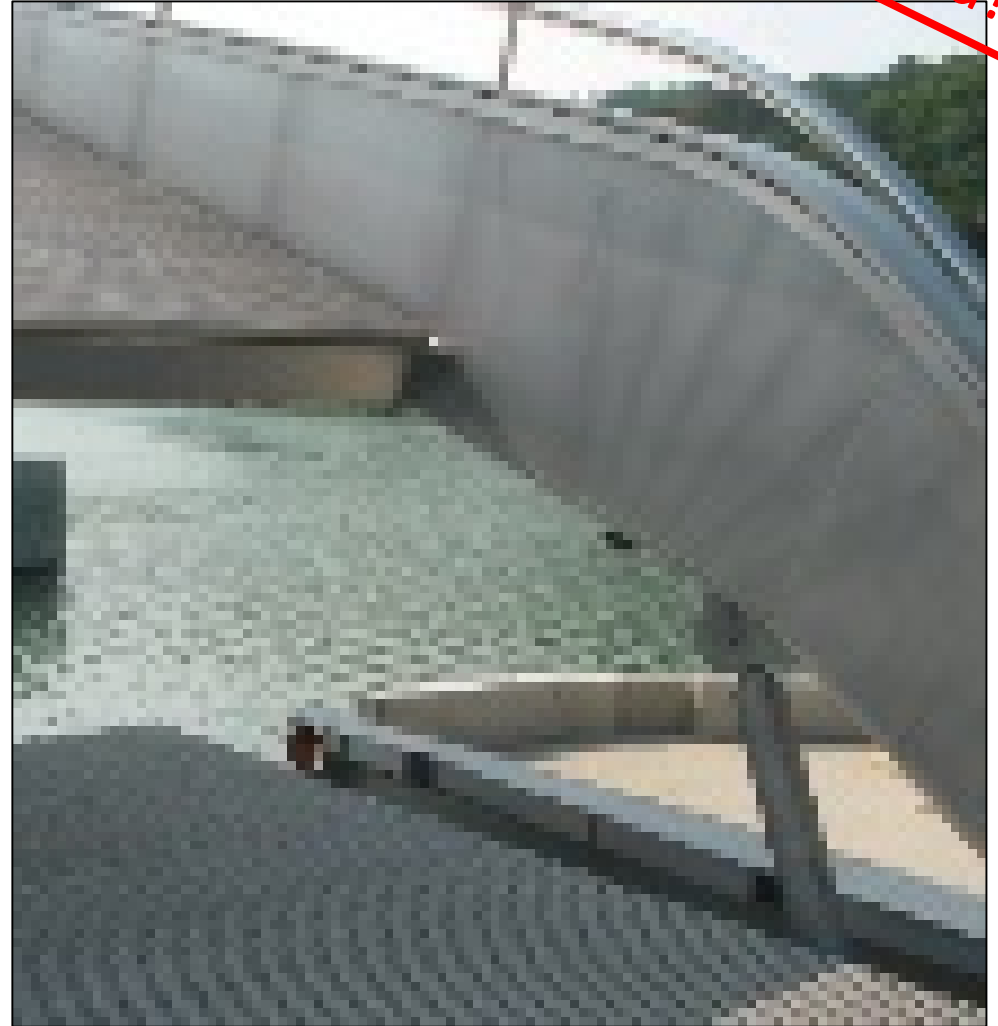
L'état de surface de l'inox ajoute à l'esthétique exceptionnelle de cette passerelle, et tout particulièrement lorsqu'elle est illuminée la nuit.



Nouveau!

Lyon, France

Cette passerelle piétons ouvrante est située dans un quartier qui vient d'être rénové et proche du nouveau Musée des Confluences. Elle permet le passage des navires qui accostent aux docks. Construite en inox duplex, ce pont est élégant, esthétique et ne nécessite aucun entretien.



Nouveau!

Trumpf, Ditzingen, Allemagne

Cette passerelle qui enjambe la voie de grande circulation Gerlinger Strasse connecte deux sites de la société TRUMPF à Ditzingen, Allemagne. Elle est faite de tôle mince, à haute résistance mécanique et à la corrosion en acier inox duplex (EN1.4462) découpé avec la technologie laser de TRUMPF. La forme très originale de cette passerelle est remarquable. L'inox duplex n'est pas réservé à des réalisations de prestige.



Nouveau!

San Diego Harbor, California

Cette structure de 168m de long est magnifique. Le tablier en courbe est suspendu par des haubans à un seul pylône incliné, une conception à la fois très simple et très élégante. L'inox duplex S31803 et l'inox austénitique 317L ont été utilisés pour les pièces de structure, les garde-corps, les cables et les connecteurs. Cette passerelle, située dans un environnement maritime, est prévue pour durer plus de 100 ans.



Nouveau!

Progreso Pier, Mexique

A gauche, ce qui reste d'une jetée construite en 1970.

L'environnement maritime a corrodé les armatures en acier au carbone et la structure d'est effondrée.

A droite, la jetée adjacente construite entre 1937 et 1941 avec des armatures en inox AISI304 (EN 1.4301). Elle n'a eu besoin d'aucun entretien et reste en parfait état.



Nouveau!

A red rectangular stamp with a double border, tilted at an angle, containing the word "Nouveau!" in a bold, sans-serif font.

Références sur l'état des ponts existants

1. <https://www.theguardian.com/world/2018/aug/16/bridges-across-europe-are-in-a-dangerous-state-warn-experts>
2. <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/keeping-european-bridges-safe>
3. <https://www.thelocal.de/20180815/bridge-collapse-cannot-be-ruled-out-in-germany-says-expert>
4. https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Ingenieurbau/Statistik/statistik-node.html
5. https://www.lemonde.fr/securite-routiere/article/2018/08/15/un-pont-sur-trois-a-besoin-de-reparations-sur-les-routes-nationales-francaises-selon-un-rapport_5342799_1655513.html
6. <https://edition.cnn.com/2019/04/02/us/deficient-bridge-report-2019-trnd/index.html>
7. <https://artbabridgereport.org/>
8. <https://www.infrastructurereportcard.org/cat-item/bridges/>

Nouveau!

Références de ponts utilisant l'acier inoxydable

1. IMO A web publication “Stainless steel in Vehicular, rail and pedestrian bridges” (March 2018) <https://www.imoa.info/stainless-solutions/archive/37/Vehicular-rail-and-pedestrian-bridges.php>
2. C Houska “More on duplex stainless steel and bridges “, The construction specifier, (May015) <https://www.constructionspecifier.com/duplex-bridges/>
3. EU Publication report “Application of duplex stainless steel for welded bridge construction in an aggressive environment”, (march 2009), ISBN 978-92-79-09948-9 <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ec2748d4-3269-43cd-9a34-3a0e1fba4e23/language-en/format-PDF/source-79161265>
4. Euro Inox publication « Pedestrian bridges in stainless steel » ISBN 2 87997 084 9 <https://www.bssa.org.uk/cms/File/Euro%20Inox%20Publications/Pedestrian%20Bridges.pdf>
5. N. Baddoo and A. Kosmač “Sustainable Duplex Sainless Steel bridges” Euro Inox publication [www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Sustainable Duplex Stainless Steel Bridges.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Sustainable_Duplex_Stainless_Steel_Bridges.pdf)
6. “San Diego’s new harbor bridge sails onto the skyline” MolyReview, (June2012) <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/pedestrian-bridges.php>

Nouveau!

Références de ponts utilisant l'acier inoxydable

7. K F. Hansen, L. Lauge and S. Kite: “Stonecuttes bridge –Detailed design” (January 2004) DOI: 10.2749/222137804796291719
https://www.researchgate.net/publication/233611421_Stonecutters_Bridge_-_Detailed_Design/link/59ce24d3aca272b0ec1a4b34/download
8. Steel Construction Institute publication : “Stonecutters bridge Towers”(2010)
www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Stonecutters_Bridge_Case_Study-2.pdf
9. G. Gedge: “Use of duplex stainless steel plate for durable bridge construction” (January 2007) DOI: 10.2749/222137807796119771
https://www.researchgate.net/publication/233632633_Use_of_Duplex_Stainless_Steel_Plate_for_Durable_Bridge_Construction
10. Champlain bridge, Montreal Nickel Institute magazine, Vol. 34, N°2, (2019)
<https://www.nickelinstitute.org/nickel-magazine/nickel-magazine-vol34-no2-2019/?lang=English&p=6>
11. Champlain bridge, Montreal Stainless Steel World online, 05 January 2016
<http://www.stainless-steel-world.net/news/58262/nas-to-supply-stainless-steel-bar.html>
12. Hong-Kong Macau bridge ISSF Publication: “Stainless steel in Infrastructure”
http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Infrastructure_English.pdf

Nouveau!

Références de ponts utilisant l'acier inoxydable

13. Hong-Kong Macau bridge
https://en.wikipedia.org/wiki/Hong_Kong%E2%80%93Zhuhai%E2%80%93Macau_Bridge
14. IMOA publication “Innovative bridge at Ft Worth, Texas” Moly-Review 1/2018
<https://www.imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/>
15. Steel Construction Institute publication: “Cala Galdana Bridge” (2010)
http://www.worldstainless.org/architecture_building_and_construction_applications/structural_applications
16. Railways Bridges in India <https://www.apnnews.com/pamban-to-become-indias-first-railway-bridge-to-use-stainless-steel-structurals/>
17. Steel Construction Institute publication: “Helix Pedestrian Bridge” (2011)
http://worldstainless.org/architecture_building_and_construction_applications/structural_applications
18. ISSF Publication: Bascule pedestrian bridge in “Stainless steel as an architectural material”
http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_as_an_Architectural_Material.pdf
19. Trumpf bridge <https://www.outokumpu.com/en/choose-stainless/2018/case-pedestrian-bridge-at-trumpf-headquarters>
20. IMOA Publication “San Diego’s new harbor bridge sails onto the skyline” MolyReview, (June 2012) <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/pedestrian-bridges.php>

Nouveau!

3. Infrastructures Côtières

37% de la population mondiale vit à moins de 100km
d'une côte

Nouveau!

Changement climatique et côtes

Quelques unes des conséquences::

- Le niveau des océans monte d'environ 3mm/an...sans retour! Des terres sont déjà/vont être submergées
- Des événements météo extrêmes deviennent plus fréquents (ouragans classe 5, super typhons...). Ils augmentent fortement les dommages
- Des changements majeurs dans les écosystèmes, essentiellement des destructions, sont en cours
- Les populations et les activités humaines sont menacées, induisant un énorme coût économique et humain.

Inondations (Sud Est de la France)

Nouveau!



Erosion côtière (lieu non spécifié)

Nouveau!



Nouveau!

Options d'adaptation côtière

- Repli organisé (c.a.d. structures mobiles, protections arrière contre les inondations, système d'alerte inondations...)
- Adaptation(c.a.d. déplacement des réservoirs, du traitement de l'eau, gestion des dunes....)
- Protection par technologies “douces” (type bancs de sable, mangroves, récifs naturels...) ou “dures” (digues, épis, renforts...)

Nouveau!

Quelques ouvrages qui
utilisent l'acier inoxydable

Mur de front de mer, Cromer, UK

Cromer, North Norfolk, est une belle station balnéaire datant de l'époque victorienne.

Elle est protégée par un mur de béton en front de mer et par des épis en bois..

A la suite d'une forte tempête en 2013, des réparations importantes et coûteuses ont été entreprises, non seulement pour remettre en état mais aussi pour anticiper 100ans de montée du niveau de la mer.

Pour ce faire, 300 T of d'acier inox duplex S32304 (EN1.4362) ont été utilisées.



Nouveau!

Digue, Bayonne, France

Nouveau!

Cette digue construite dans les années soixante abrite l'entrée du port de Bayonne. Côté mer, des blocs de béton de 40T dissipent l'énergie des vagues . Une plate-forme centrale supporte une grue qui remplace ces blocs au fur et à mesure de leur usure. La plateforme qui commençait à se fissurer a été refaite en béton armé d'acier inox austéno-ferritique à haute résistance S32205 (EN1.4462). La très haute limite d'élasticité de l'acier, 750MPa, a permis de limiter à 130T seulement la quantité d'armatures nécessaires.



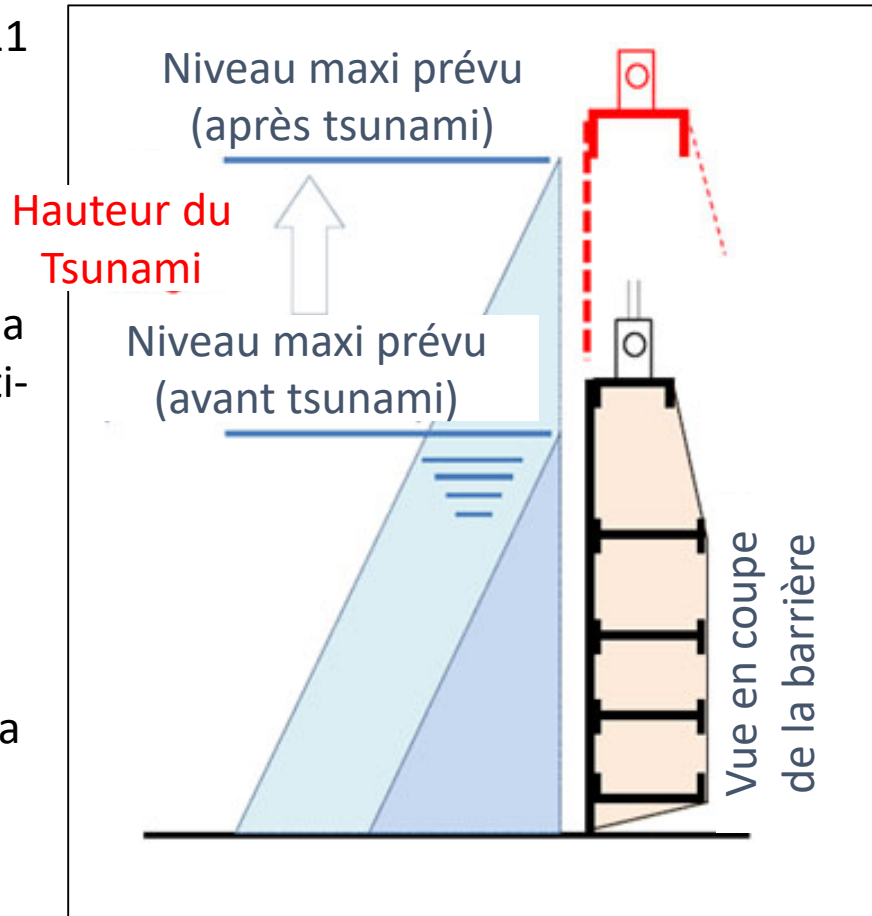
Reconstruction résiliente après catastrophes au Japon

Nouveau!

Le grand séisme à l'est du Japon de Mars 2011 a fait environ 16000 victimes, 90% d'entre elles causées par le tsunami qui fut exceptionnellement important.

Suite à ce séisme, le gouvernement japonais a revu la hauteur exigée pour les barrières anti-tsunami, qui passe de 5m à 8m.

Pour résister à une pression d'eau plus forte, les barrières doivent être plus résistantes. NIPPON STEEL Stainless Steel Corporation a proposé d'utiliser un acier inox austéno-ferritique économique ("lean duplex") dont la haute résistance mécanique a permis une réduction de poids et une conception plus simple.



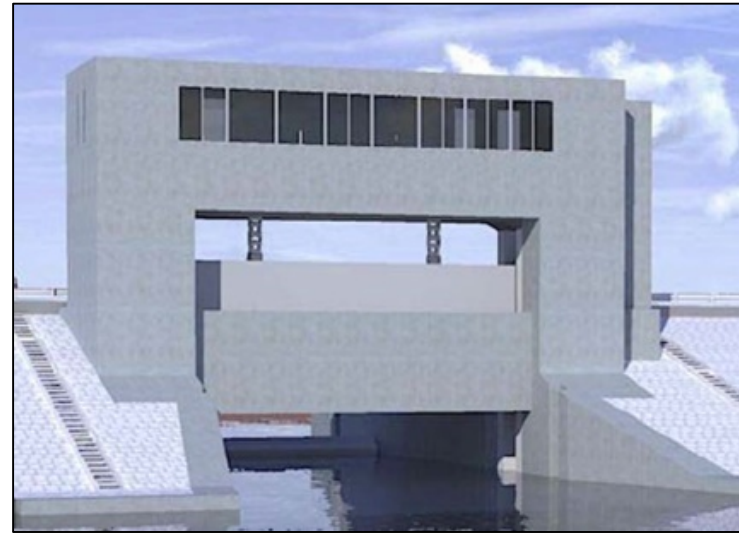
Source: NIPPON STEEL Stainless Steel Corporation

Exemples

Nouveau!



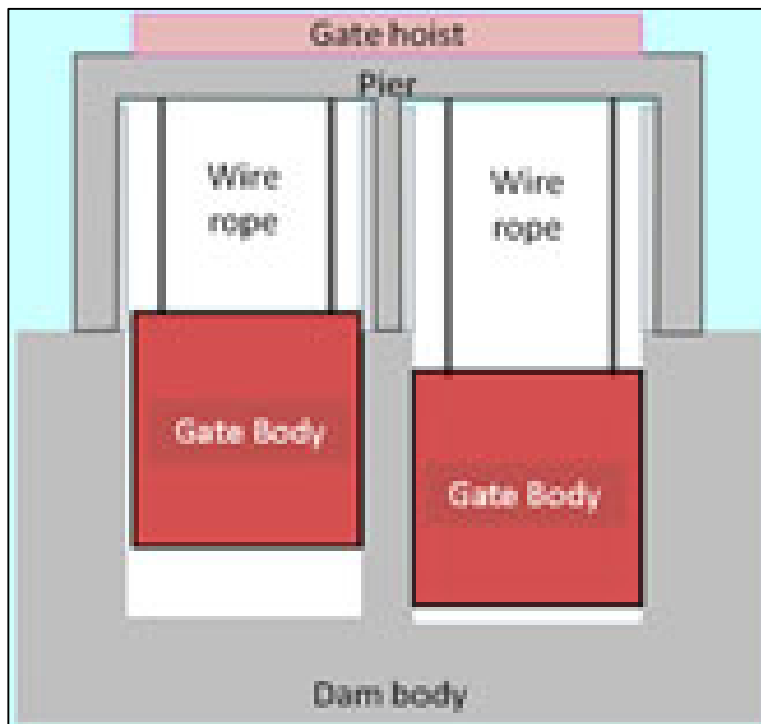
Hauteur: 8.2 m x Largeur 15 m



Hauteur: 6.2 m x Largeur 15 m

Nouveau!

Gain de poids des barrières obtenu en utilisant des aciers inox austéno-ferritiques « éco »



	Acier Carbone (SM490)	Inox standard (SUS 304)	Duplex eco (NSSC2120)
Poids (T)	16.1	14.7	12.1

Comparatif de solutions
7m x 7.8m = 54.6m²)

25% de réduction de poids

Source: Electric power civil engineering (2016.9)

Quelques grand projets au Japon

Nouveau!

Les aciers inox austéno-ferritiques sont utilisés dans plus de 50 barrières notamment dans le cadre du programme de reconstruction post-séisme



Kanogawa Dam (SUS821L1)



Kotonoura Gate (SUS316LN)
Hikata Gate (SUS323L)



Kosode Gate (SUS821L1)



Koishihama Gate (SUS821L1)



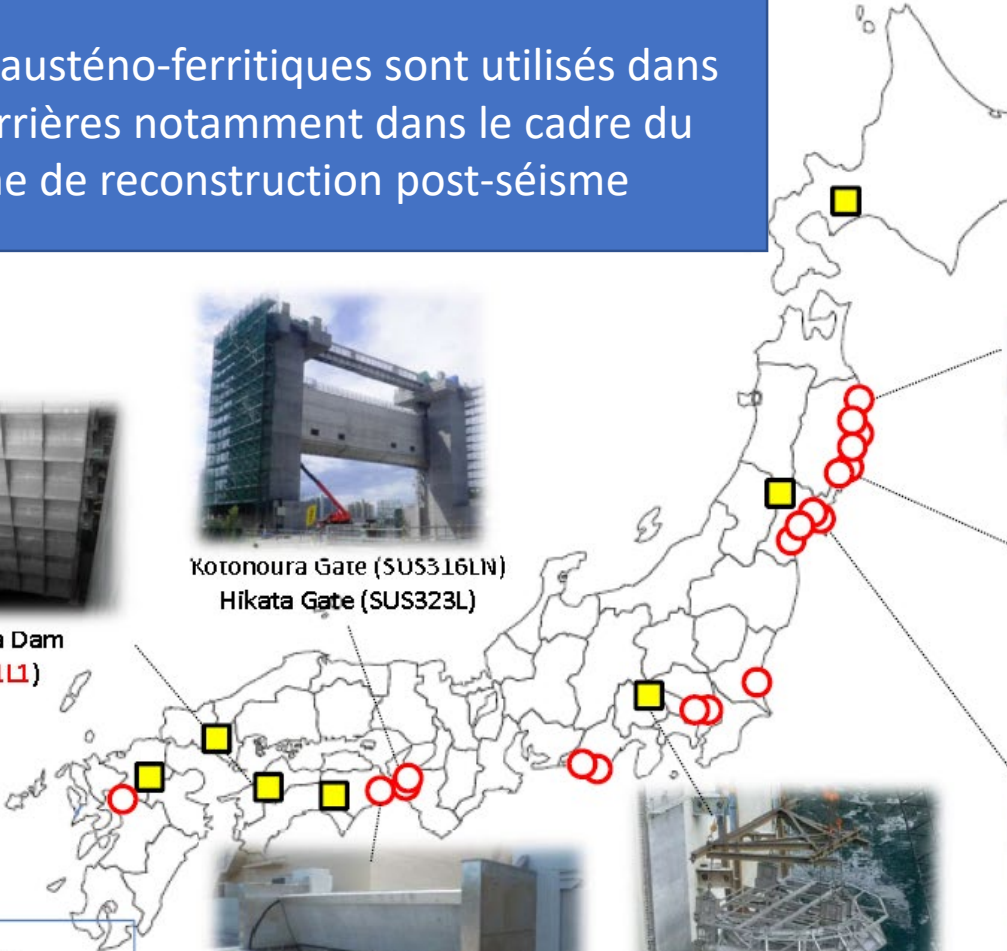
neo Rise (SUS821L1)



Futase Dam (SUS821L1)



Tsukihama Gate (SUS323L)



- : DAM
- : Water Gate

Barrière de Kamihirai, Japon

Nouveau!



Vue de la barrière en cours de construction

Mont Saint Michel, France

Nouveau!



Nouveau!

Mont Saint Michel, France

- Le Mont Saint Michel, avec son cloître et la statue de l'ange au sommet est l'une des attractions touristiques les plus visitées.
- Lentement, l'envasement rattachait l'île au continent, changeant le paysage.
- Un barrage fonctionnant comme un système de chasse d'eau a été construit pour retenir l'eau de la rivière qui se jette dans la baie et la relâcher à marée basse, emportant des sédiments vers la mer deux fois par jour. Les 8 écluses du barrage utilisent 36 T d'acier inox austéno- ferritique S32205 (EN 1.4462) choisi pour sa résistance à la corrosion et à l'abrasion
- Le Mont Saint Michel redevient une île.

Monaco s'agrandit sur la mer

TL Principauté de Monaco, sur la mer Méditerranée, agrandit son petit territoire (2km²) sur la mer pour y construire 600 000m² de surfaces de plancher pour un coût estimé à 2 milliards d'Euros.

Les défis techniques sont énormes: installation d'un batardeau, construction des murs de béton remplissage de l'espace ainsi délimité et préparation du sol pour la construction d'immeubles résidentiels, réduction de l'impact sur la vie marine, etc....

Plus de 4000MT d'armatures inox austeno ferritique S32304 (EN1.4362) seront utilisées dans les murs de béton pour assurer leur durabilité et l'absence de corrosion pour au moins un siècle,



Références

Nouveau!

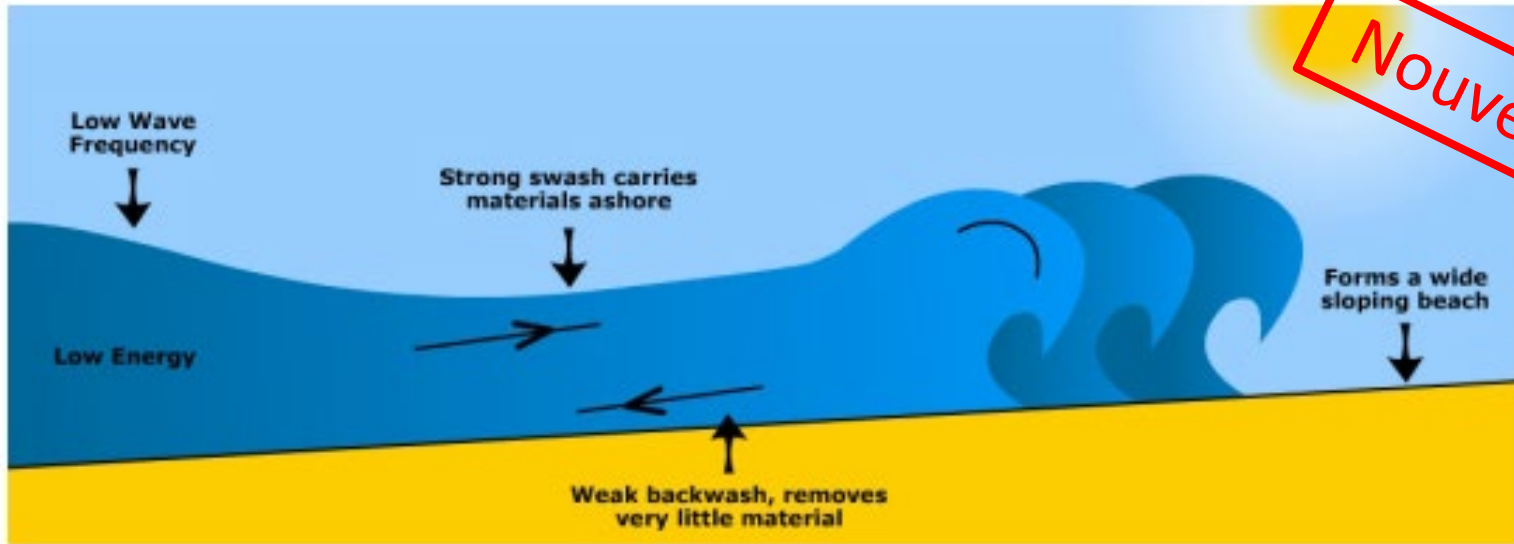
1. <https://www.ipcc.ch/>
2. www.unfccc.int/resource/docs/tp/tp0199.pdf
3. <https://www.novethic.fr/actualite/environnement/biodiversite/isr-rse/le-changement-climatique-grignote-nos-cotes-et-menace-plus-d-un-million-de-francais-147571.html>
4. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/adapter-documents-conception-entretien-exploitation>
5. <https://www.cerema.fr/fr/evenements/territoires-littoraux-transition-face-au-changement>
6. <https://www.unenvironment.org/explore-topics/oceans-seas/what-we-do/working-regional-seas/coastal-zone-management>
7. Sea Wall at Cromer <http://www.stainlesssteelrebar.org/applications/coastal-protection-at-cromer-uk/>
8. Bayonne breakwater <http://stainlesssteelrebar.org/applications/bayonne-breakwater/>
9. <https://www.constructioncayola.com/batiment/article/2008/11/20/23050/l-inox-pour-resister-atlantique>
10. Tsunami-proof floodgates Japan (NSSC presentation)

Références

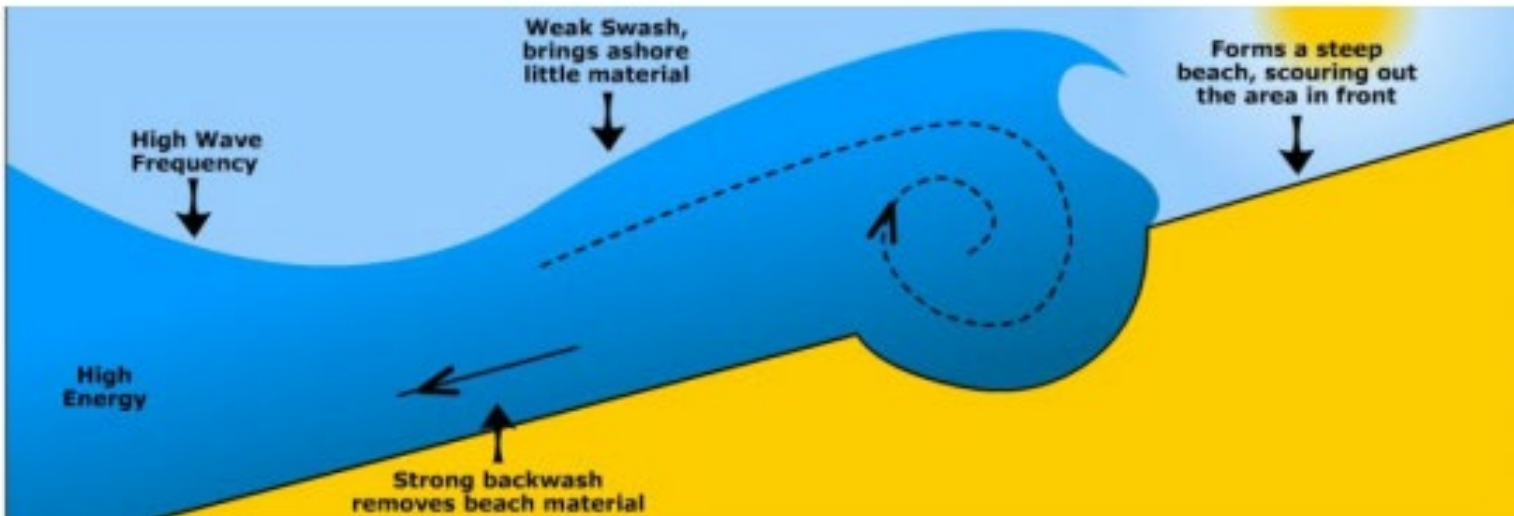
Nouveau!

11. Sluices Mt St Michel
<https://www.nickelinstitute.org/en/NickelMagazine/MagazineHome/AllArchives/2015/Volume30-3/InUseMontStMichel.aspx?selected=year>
https://europe.arcelormittal.com/europeprojectgallery/foi_montsaintmichel
12. Tammeroski floodgate
<http://www.pratiwisteel.com/news/view/20110708090600/Outokumpu-Duplex-Stainless-Steel-For-Sluice-And-Flood-Gates-Structures-In-Finland.html>
<https://www.pontek.fi/in-english>
13. Monaco
<https://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/Extension-en-mer-de-Monaco.pdf>
14. Gårda Dämme floodgate, Göteborg
<https://www.outokumpu.com/en/choose-stainless/2016/floodgates-to-fight-rising-sea-levels>
15. <https://coastal-environments.weebly.com/landforms-and-processes.html>

Les vagues construisent et détruisent les côtes¹



Constructive Waves



Destructive Waves

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

Module 3

Pourquoi utiliser l'acier inoxydable ?

Introduction

Principaux matériaux utilisés en
architecture, bâtiment et
construction

Comparaison des principaux matériaux de construction de bâtiments utilisés aujourd'hui

Actualisé !

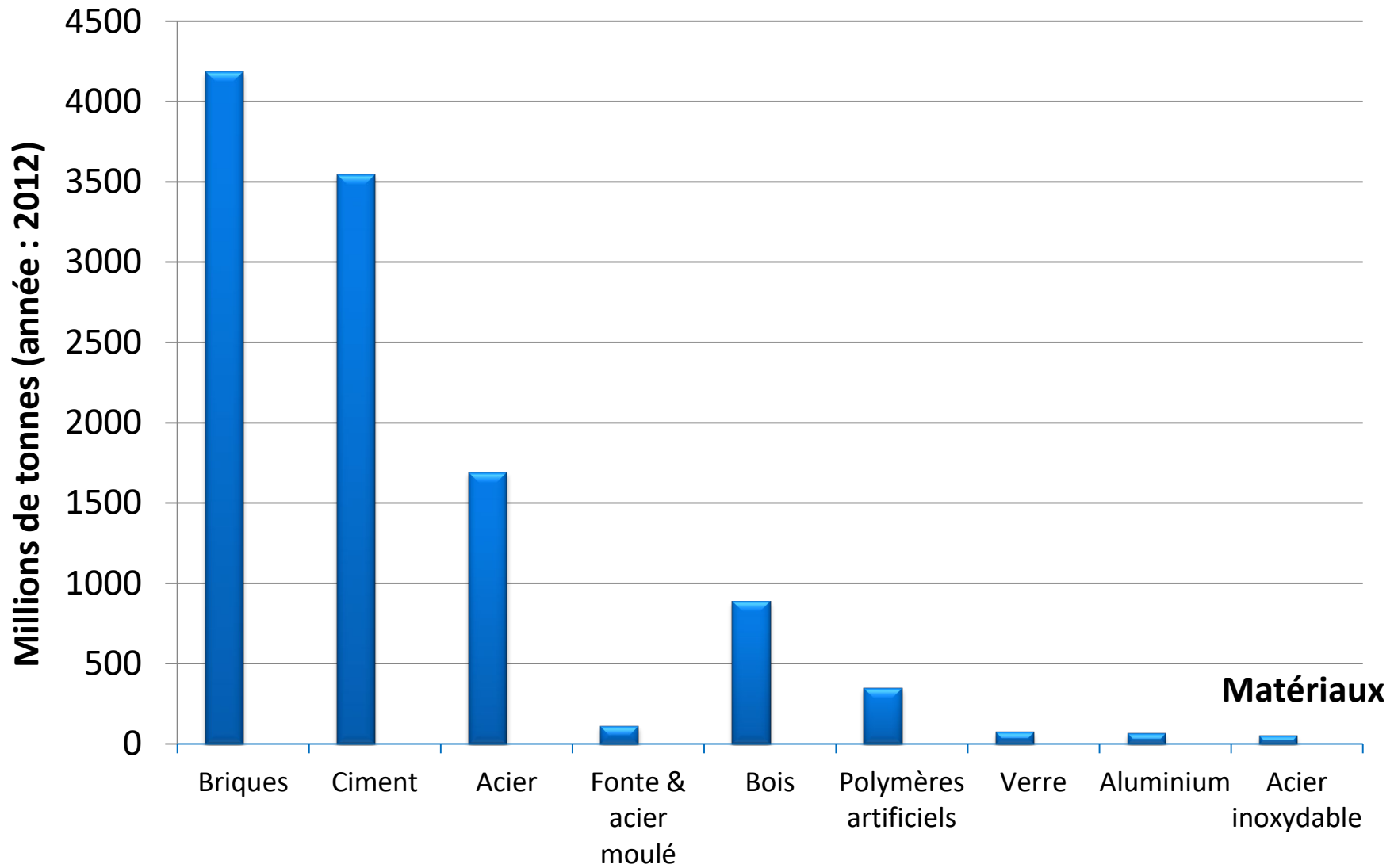
Pourquoi utiliser l'acier inoxydable ?

3

Matériaux	Production mondiale (en Millions de tonnes)	Densité moyenne	Remarques
Terre compressée, <i>pisé</i>	Non disponible		Utilisé dans l'habitat traditionnel, principalement en Afrique. Bénéficie d'un intérêt renouvelé pour ses propriétés environnementales.
Briques ²	4185	2,0	Année probable 2017 Dont 87% en Asie.
Ciment ³	3545	2,4**	(pour obtenir le chiffre pour le béton, multiplier par 3 ou 4) ** Densité du béton - Note : chiffres 2018
Acier ^{4a}	1690	7,8	(Production brute d'acier en 2018) Dont 14% dans les infrastructures et pour moitié sous forme de rond à béton. Dont 42% dans le bâtiment ¹²
Fonte et acier moulé ^{4b}	110	7,8	Données de 2017 parmi lesquelles 46 Mt de fonte grise, 25 Mt de fonte ductile, 1 Mt de fonte malléable et 10 Mt d'acier
Bois ⁵	887	0,55	Bois scié + panneaux de bois exclusivement (chiffres 2016) Hors pâte à papier (656). Hors bois énergie (1860) et autres produits de bois.
Polymères artificiels ⁶	348	1,1	Quelques polymères naturels : cellulose, caoutchouc, soie, chitine Chiffres 2017
Verre ⁷	75	2,6	Verre plat uniquement (80% du marché total). Autres marchés significatifs: Automobile, Panneaux Solaires. Pour la production totale de verre, multiplier par 3
Aluminium ⁸	64	2,7	(Production brute d'aluminium de 2018) 24% est utilisé dans le bâtiment ¹⁰
Acier inoxydable ⁹	51	7,8	Chiffres 2018. 17 % sont destinés à la construction ¹¹

Actualisé !

Comparaison entre les matériaux utilisés actuellement : Histogramme



Pourquoi utiliser l'acier inoxydable ?

Module d'Young E de différents matériaux¹² (rigidité)

Matériaux	Module de Young E (GPa)
Aciers	~210
Aciers inoxydables	~210
Alliages de cuivre	~130
Alliages de titane	~100
Alliages d'aluminium	~70
Béton	~40
Bois	~10
Plastiques	~4

Les aciers
inoxydables sont
aussi rigides que
l'acier

Rappel :

Aire de la section : A



Longueur L



Contrainte : $\sigma = F/A$

Déformation : $\epsilon = \Delta L/L$

Loi de Hooke : $\sigma = E \epsilon$

Module de Young : $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\text{Contrainte}}{\text{Déformation}} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$

Ratio résistance/poids pour des métaux utilisés en construction¹³

Les inox offrent un rapport
résistance/poids comparable aux
aciers et aux alliages d'aluminium

Matériaux	Limite d'élasticité f_y (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Masse spécifique (kg/dm ³)	Ratio Résistance (f_y) /Masse spécifique	Allongement à rupture minimum (%)
Acier inoxydable 304 ou 316, recuit	205	515	7,8	26	35
Acier inoxydable 304 ou 316, écroui CP 350	350	-	7,8	45	-
Acier inoxydable 304 ou 316, écroui CP 500	480	-	7,8	62	-
Duplex 2205	500	700/950	7,8	64	20
Acier inoxydable 630, durci par précipitation	800	950/1150	7,8	103	10
Tôle d'acier au carbone courant laminée à chaud	234	317	7,8	30	35
Acier de construction (plaques et barres)	250	400/550	7,8	32	23
Acier micro-allié à haute résistance	380	460	7,8	49	25
Acier de construction 4140 trempé & revenu	750	930/1080	7,8	96	12
Alliage d'aluminium 3003-H14	145	150	2,7	37	40
Alliage d'aluminium 3105-H14	150	170	2,7	38	5
Alliage d'aluminium 5005-H16	170	180	2,7	44	5
Alliage d'aluminium 6061-T6	275	310	2,7	71	12
Alliage d'aluminium 6063-T5	145	185	2,7	37	12
Cuivre	195	250	8,3	23	30

Comparaison simplifiée des caractéristiques de différents matériaux¹⁴

		Aciers inoxydables			Cuivre	Aluminium	Acier au carbone	Plastiques
Propriétés		EN 1.4521 AISI 444	EN 1.4301 AISI 304	EN 1.4401 AISI 316				
Physiques	Densité	-	-	-	--	+	-	++
	Dilatation linéaire	++	0	0	0	-	+	--
	Conductivité électrique	--	-	-	+++	++	0	---
	Ferromagnétisme	OUI	NON	NON	NON	NON	OUI	NON
Mécaniques	Rigidité (module de Young)	+++	+++	+++	+	-	+++	---
	Traction	+	++	++	0	-	+ / ++	--
	Allongement	+	+++	+++	+++	++	0	-- / +++
Autres	Fabrication	++	++	++	+	0	++	-
	Hautes températures	++	++	+++	0	-	+	---
	Basses températures	-	+++	+++	+	0	-	-
	Résistance à la corrosion	+++	+++	++++	++	+	--	+

Symboles : + Avantages - Faiblesses (comparativement aux autres matériaux)

L'acier inoxydable est un
matériau « jeune »

Au cours de l'histoire, de nouveaux matériaux sont apparus. Les aciers inoxydables sont parmi les plus récents*

Matériaux	Période d'apparition	
Terre compressée, <i>pisé</i>		A été utilisée dès l'aube de l'humanité !
Bois ¹⁵		A été utilisé dès l'aube de l'humanité !
Brique ¹⁵	7500 av. J.C. 4500 av. J.C.	Briques de terre cuite/céramiques
Acier ¹⁵	4000 av. J.C. 1858	Atelier de forgerons Procédé Bessemer
Verre artificiel ¹⁵	3500 av. J.C. 100 av. J.C. 1950	Première fabrication de verre Verre transparent Procédé Pilkington (verre flotté)
Aluminium ¹⁵	1825 1886	Oersted découvre l'aluminium Procédé Hall-Héroult (électrolyse)
Béton armé ¹⁵	1850 1885	Mais le ciment est beaucoup plus ancien Procédé par four rotatif
Polymères artificiels ¹⁵	1846 1907 1939	Celluloïd Bakélite Nylon
Acier inoxydable ²	1912-1913 1954 1955	Premiers alliages Procédé AOD (pour Argon-Oxygène-Décarburation) Laminage sur Train à Bandes

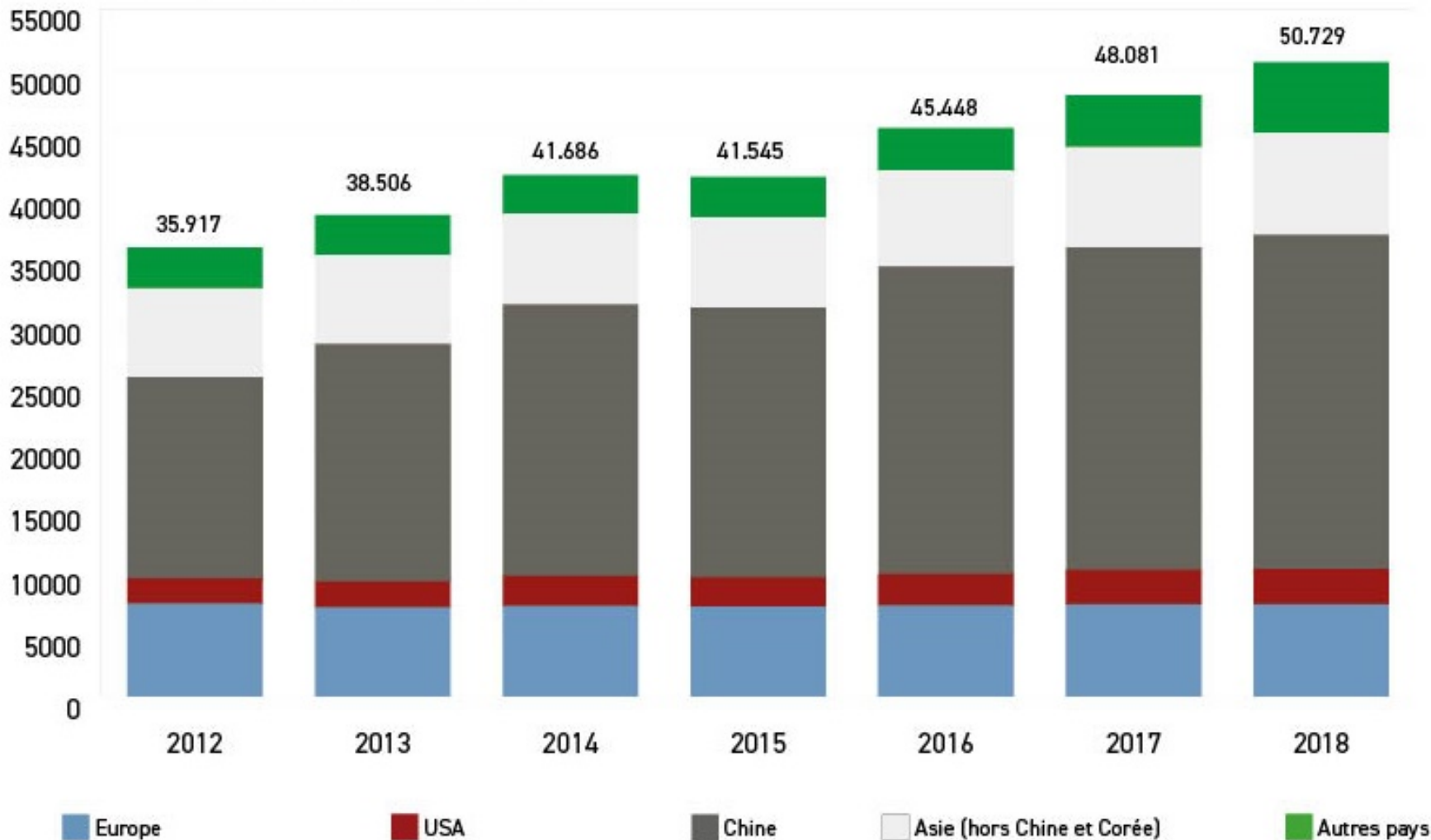
* Il existe bien sûr d'autres matériaux plus récents, mais utilisés en quantités peu significatives

Production mondiale d'acier inoxydable par zones géographiques²

Actualisé

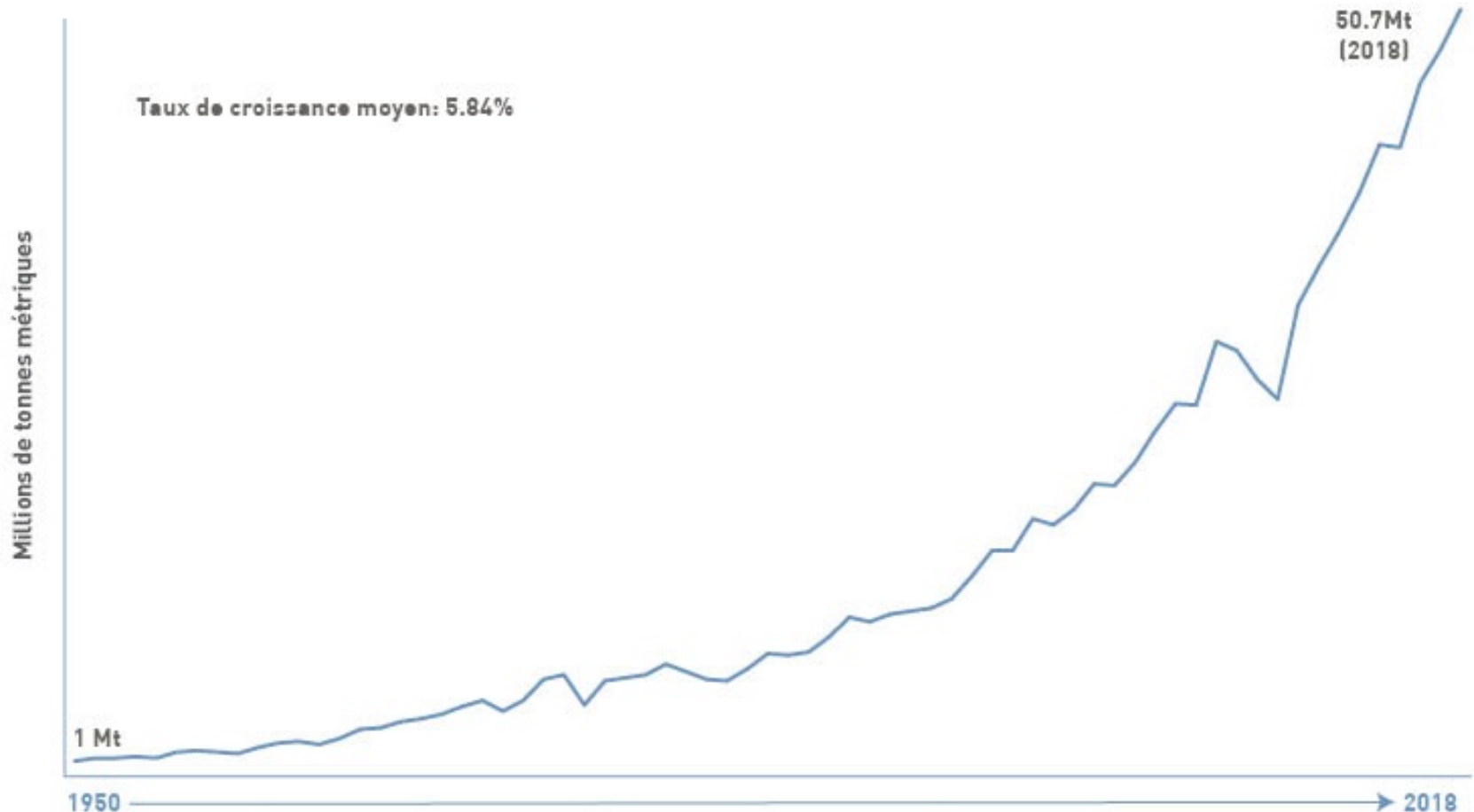
La demande est croissante

Production brute inox (équivalent brame/ingot) par région en milliers de tonnes métriques
Autres pays: Brésil, Russie, Afrique du Sud, Corée du Sud, Indonésie



Actualisé

Taux de croissance annuel moyen mondial Production brute d'inox²² (Millions de tonnes métriques)



Pourquoi l'acier inoxydable ?

En raison d'un ensemble de propriétés remarquables

- 1. Résistance à la corrosion** (voir module 5)
 - Dans tous les environnements : de tropical à polaire, en mer ou dans le désert, pollué ou non...
 - Autoréparant contrairement aux revêtements
- 2. Dure éternellement** avec peu ou pas d'entretien
- 3. Large éventail de propriétés mécaniques** selon les différentes familles d'aciers inoxydables (Austénitiques Cr-Ni – Austénitiques Cr-Mn – Ferritiques Cr – Duplex – Martensitiques Cr C) qui sont maintenant intégrées dans les principales normes de construction. Sans oublier une excellente résistance au feu (voir modules 6 et 7B)
- 4. Esthétique** : Grand choix de finitions de surface et de couleurs (voir module 8). Plus résistance aux dégradations dans les espaces publics
- 5. Facile à fabriquer/à assembler** (voir module 9)
- 6. Excellent en Développement Durable** (voir module 11)
 - Possède une grande durée de vie avec entretien minimal ou sans entretien.
 - 100 % recyclable (et recyclé à plus de 85 %) en fin de vie en acier inoxydable sans perte de caractéristiques
- 7. Sain et hygiénique** : Inerte, pas de contaminations, facile à nettoyer et à désinfecter
- 8. Propriétés spécifiques** : magnétique/non magnétique....

Qu'est-ce qui limite l'utilisation des aciers inoxydables ? Le prix

Les aciers inoxydables sont chers : Vrai ? ou Faux ?

Réponse : **Oui** et **Non**

Oui :

Si seul compte le coût initial du matériau (généralement à cause de moyens financiers limités au départ...)

Mais, ensuite, un mauvais choix peut coûter très cher :

- Le prix de l'acier inoxydable ne représente souvent qu'une petite partie du coût total du projet
- Les réparations intempestives et l'entretien peuvent générer des coûts directs et indirects énormes

Non :

si

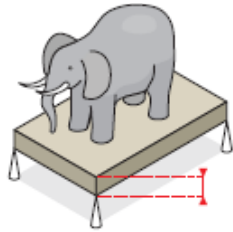
- Le Coût Global de Possession (CGP –LCC en anglais), c'est à dire le coût « réel », est pris en compte, c.à.d. si l'on inclut les coûts d'entretien, la durée de vie de la construction, son coût de remplacement de déconstruction*
- La conception est optimisée : des structures résistante et rigides peuvent être obtenues par les formes complexes de tôles minces, utilisant ainsi très peu de matière.

**Il est dans l'intérêt du client de toujours faire son choix à partir d'une analyse du CGP (LCC).*

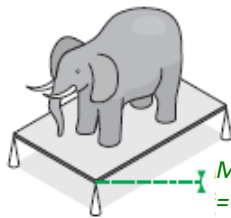
L'acier inoxydable (ainsi que d'autres métaux) nécessite moins de matière¹⁶

FAIRE PLUS AVEC MOINS

En raison de leur grande résistance, les métaux peuvent supporter des charges élevées avec moins de matière ou être utilisés pour renforcer d'autres matériaux



Matériaux non métalliques

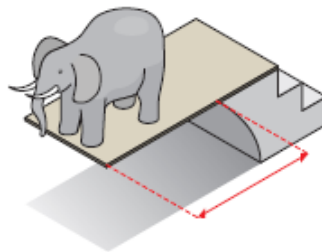


Métaux

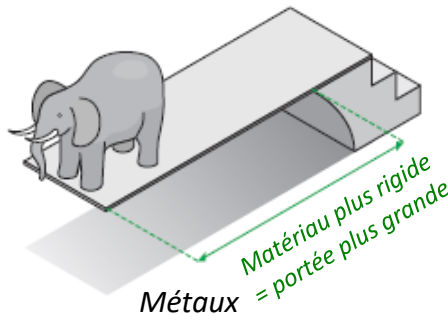
*Moins de matière
= épaisseur
réduite*

DES CONCEPTEURS PLUS LIBRES

Grâce à leur rigidité importante, les métaux permettent de franchir des portées plus grandes offrant ainsi une plus grande liberté de conception



Matériaux non métalliques



Métaux

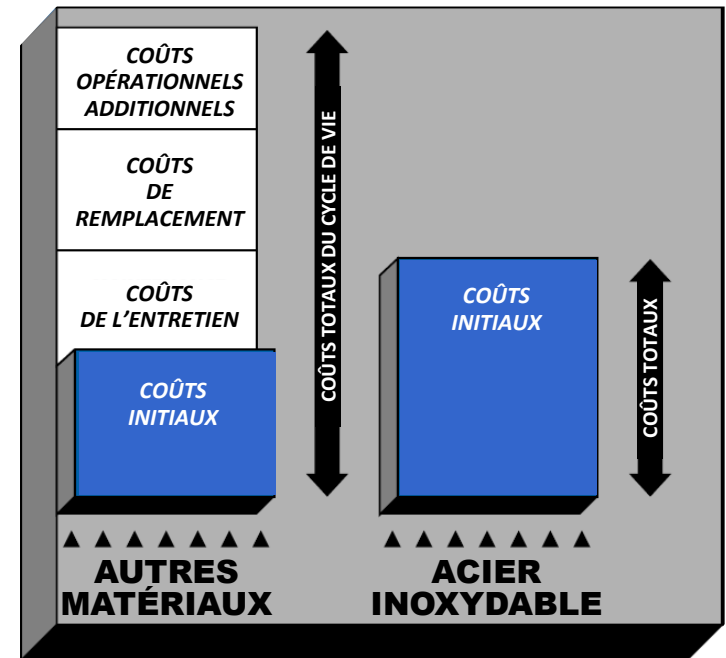
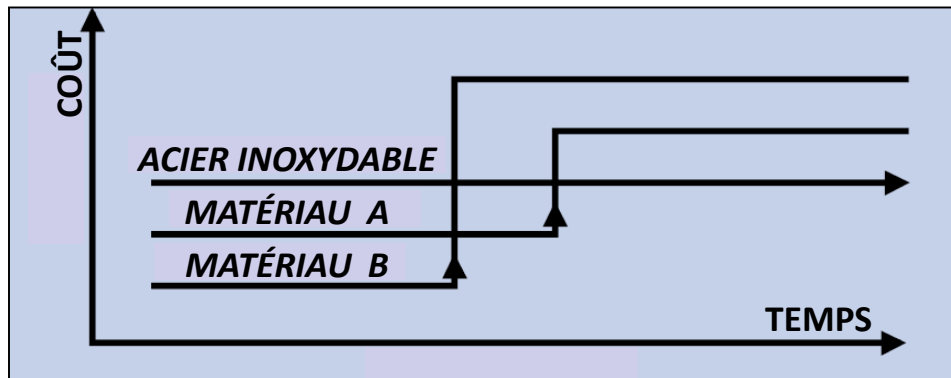
*Matériau plus rigide
= portée plus grande*

Des tôles en acier inoxydable de faible épaisseur : 0,4 mm et 0,6 mm sont couramment utilisées.

Poids : respectivement 3,12 kg et 4,68 kg seulement par m² !





Pourquoi l'acier inoxydable n'est pas cher si l'on prend en compte l'aspect financier du cycle de vie

Le coût de structures réalisées avec d'autres matériaux augmente substantiellement dans le temps alors que celui des structures en acier inoxydable reste habituellement constant.



Le coût de la corrosion dépasse 276 milliards de \$ rien qu'aux USA¹⁷

Comparaison du coût de possession de 2 structures^{18,19}

Structure	Terminée en	Matériau	Hauteur	Entretien
Tour Eiffel – Paris* 	1889 	Fer puddlé	324 m	Tous les 7 ans. Chaque campagne de peinture dure environ 1 an et demi (15 mois). 50 à 60 tonnes de peinture, 25 peintres, 1500 pinceaux, 5000 disques de meulage et 1500 ensembles de vêtements de travail.
Chrysler Building (toiture et entrée) – New York 	1930 (toiture 1929) 	Acier inoxydable austénitique (nuance : 302)	319 m	Deux fois en 1951 puis en 1961 et en 1995. Le produit de nettoyage utilisé en 1961 est inconnu. Un détergent dégraissant et abrasif doux a été utilisé en 1995.

* La tour Eiffel a été construite avant que l'acier inoxydable ne soit inventé... Elle était supposée être une structure temporaire mais le public l'a adorée et adoptée !

Autre exemple :

Comparaison de l'entretien de 2 ponts très connus^{20,21} :

- Le pont du Golden Gate à San Francisco
- Le pont de Stonecutter à Hong Kong



Le pont du Golden Gate (1937), San Francisco

<- Entretien



« une solide équipe de **13 métalliers** de **3 monteurs**, plus **28 peintres**, **5 manœuvres** et **un contremaître** se battent contre le vent, l'air marin et le brouillard, souvent suspendus très haut au-dessus du détroit, pour réparer les effets de la corrosion de l'acier. Les métalliers remplacent l'acier et les rivets corrodés par des boulons à haute résistance, réalisent les petites modifications nécessaires à l'utilisation du pont et assistent les peintres avec leurs échafaudages. Les charpentiers métalliers se chargent également de démonter des plaques et des barres pour permettre aux peintres d'accéder à l'intérieur des pylônes et des traverses. Les peintres préparent toutes les surfaces de l'ouvrage et repeignent toutes les parties corrodées. »²⁰

Le pont de Stonecutter (2009), Hong Kong

<- Entretien



Détails du projet : Pont à haubans d'une longueur de 1 596 m conçu pour résister aux typhons. Le tablier est à 2 × 3 voies pour une portée libre de 1 018 m. Il libère un gabarit de 73,5 m de hauteur.

Matériaux : Plaques d'acier inoxydable EN1.4462 (Duplex) de limite d'élasticité 450 MPa utilisées pour les pylônes du niveau +175 m jusqu'au sommet à +295 m et pour la peau de la partie inférieure.

Pourquoi l'acier inoxydable plutôt que l'acier au carbone : Le pont est conçu pour une durée de vie de 120 ans dans un environnement marin chaud et pollué. Il est conçu pour ne nécessiter aucun entretien.²¹

Références principales (1/2)

1. <http://worldstainless.org/>
2. (a) <http://www.hablakilns.com/the-brick-industry/the-brick-market/>
(b) [http://wiki.answers.com/Q/What is the weight of a red clay brick in Kilograms](http://wiki.answers.com/Q/What_is_the_weight_of_a_red_clay_brick_in_Kilograms)
3. CEM bureau <https://cembureau.eu/cement-101/key-facts-figures/>
4. (a) <https://www.worldsteel.org/> (b) www.globalcastingmagazine.com
5. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>
6. <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>
7. (a) <http://www.glassforeurope.com/en/industry/global-market-structure.php> (b)
<https://www.statista.com/statistics/609964/flat-glass-market-key-info-globally-projection/>
8. <http://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>
9. [http://worldstainless.org/statistics/crude steel production](http://worldstainless.org/statistics/crude_steel_production)
10. <http://www.withbotheyesopen.com/>
11. <http://www.ssina.com/overview/markets.html>
12. <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatabooks/materials.pdf>
13. http://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/CapabilitiesandLimitationsofArchitecturalMetalsandMetalsforCorrosionResistancel_14057a_.pdf
14. <http://www.aperam.com/>
15. [Wikipedia](#)
16. <https://european-aluminium.eu/media/1310/en-metals-for-buildings-essential-fully-recyclable.pdf>

Références principales (2/2)

17. US Federal Highway administration reports FHWA-RD-01-156 and 157 www.corrosioncost.com
18. a) <https://www.tou Eiffel.paris/en> b) <http://corrosion-doctors.org/Landmarks/Eiffel.htm>
19. a) http://en.wikipedia.org/wiki/Chrysler_Building b) https://www.nickelinstitute.org/library/?opt_perpage=20&opt_layout=grid&searchTerm=11023&page=1
20. <http://goldengatebridge.org/research/facts.php#IronworkersPainters>
21. https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Structural/Stonecutters_Bridge_Towers.pdf
22. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Figures_2019_English_public_version.pdf

Merci !

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

Module 4

Qu'est-ce qu'un acier inoxydable ?

Vidéos



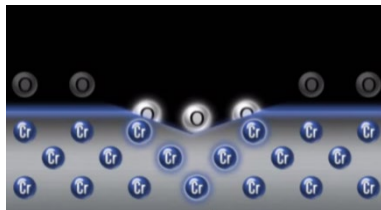
100 ans d'acier inoxydable

<https://youtu.be/s-vOzrs0m9E>



Allié pour créer de la valeur durable

<https://youtu.be/NW4pJwdeISA>

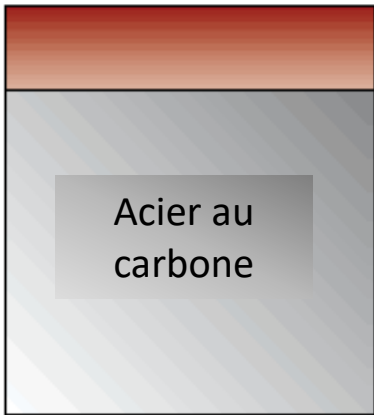


Autoréparable pour créer de la valeur durable

<https://youtu.be/z6KoYQXY8T4>

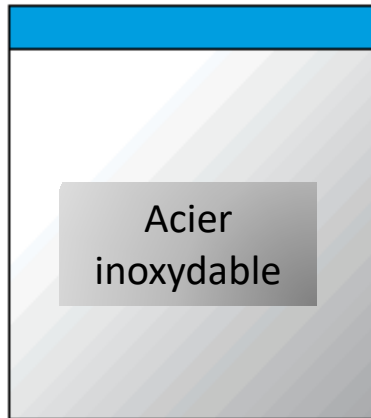
Les aciers inoxydables sont des alliages à base de fer qui contiennent au moins 10,5 % de chrome

Oxydes de fer (rouille)
> 20 μm d'épaisseur



< 11 % de chrome

Film de surface passif
 $\sim 2\text{nm}$ d'épaisseur

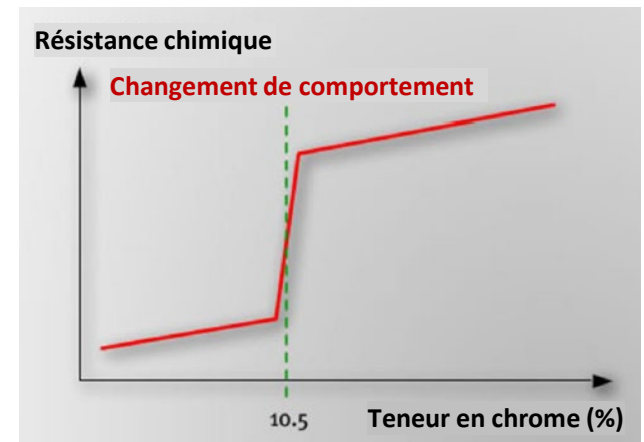


> 11 % de chrome

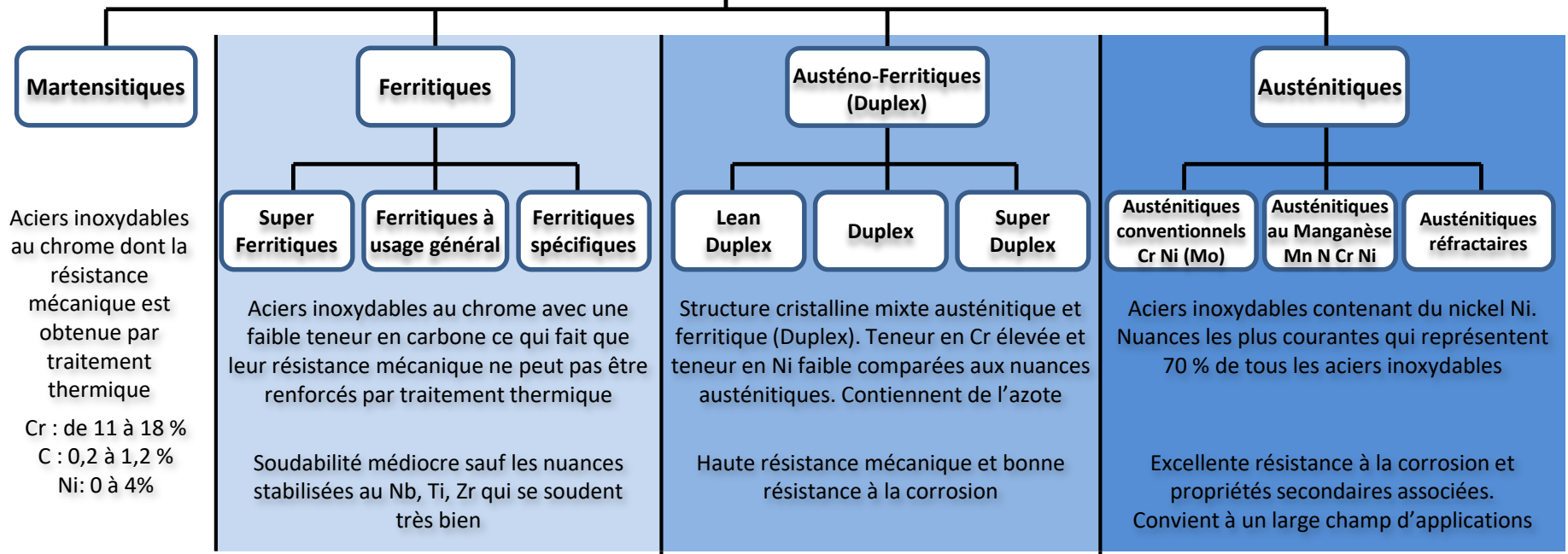
→ résistance à la corrosion

Le film passif se forme en quelques minutes

Augmenter la teneur en chrome (Cr) augmente l'efficacité du film passif... mais il y a d'autres facteurs importants qui influent sur la résistance à la corrosion (voir Module 5)



Aciers inoxydables

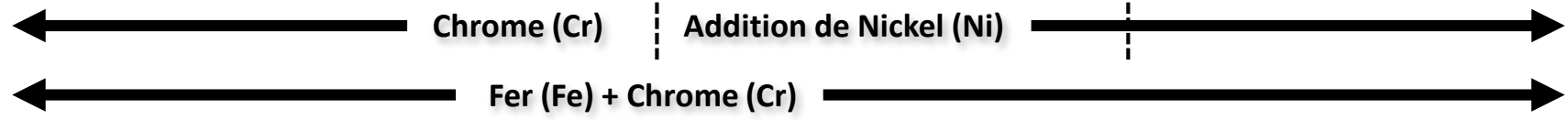
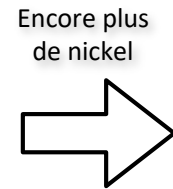
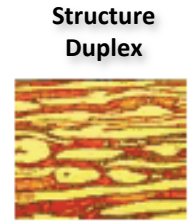
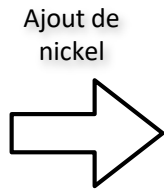


Aciers inoxydables au chrome dont la résistance mécanique est obtenue par traitement thermique
 Cr : de 11 à 18 %
 C : 0,2 à 1,2 %
 Ni : 0 à 4%

Aciers inoxydables au chrome avec une faible teneur en carbone ce qui fait que leur résistance mécanique ne peut pas être renforcés par traitement thermique
 Soudabilité médiocre sauf les nuances stabilisées au Nb, Ti, Zr qui se soudent très bien

Structure cristalline mixte austénitique et ferritique (Duplex). Teneur en Cr élevée et teneur en Ni faible comparées aux nuances austénitiques. Contiennent de l'azote
 Haute résistance mécanique et bonne résistance à la corrosion

Aciers inoxydables contenant du nickel Ni. Nuances les plus courantes qui représentent 70 % de tous les aciers inoxydables
 Excellente résistance à la corrosion et propriétés secondaires associées. Convient à un large champ d'applications



Qu'est-ce qu'un acier inoxydable ?

Les nuances au Cr-Ni (Austénitiques)⁴

Sous-groupes :

▪ Cr-Ni	Typiquement EN 1.4301/AISI 304	Cr : 18	Ni : 9		Fe : Complément
▪ Cr-Ni-Mo	Typiquement EN 1.4401/AISI 316	Cr : 18	Ni 10	Mo : 2,5	Fe : Complément

Propriétés communes :

- Très bonne résistance à la corrosion qui augmente avec la teneur en éléments d'alliage
- ... mais qui présentent un risque de Corrosion sous Contraintes (CSC) en atmosphère chlorée chaude (cas des piscines par exemple)
- Ductilité et résilience élevées à toutes les températures (y compris très basses)
- La résistance mécanique peut être augmentée par déformation à froid (mais pas par traitement thermique)
- Très bonne résistance au feu
- Très bonnes caractéristiques de formage à chaud et à froid (ductilité, allongement)
- Facile à souder (TIG, MIG)

Les mieux connues et toujours les plus utilisées aujourd'hui

Code couleur : ▪ Résistance à la corrosion ▪ Caractéristiques mécaniques ▪ Fabrication

Les nuances au Cr-Mn (Austénitique avec Manganèse)⁵

Nuance typique :

▪ Cr-Mn-Ni-N	Typiquement EN 1.4372/AISI 201	Cr : 17	Mn : 7	Ni : 4	N : 0,15	Fe : Complément
--------------	--------------------------------	---------	--------	--------	----------	-----------------

Propriétés communes :

- Résistance à la corrosion plus faible
- ... mais beaucoup plus sensibles à la CSC et aux piqûres, particulièrement pour les basses teneurs en Ni et en Cr
- Plus grande résistance mécanique
- Mauvaises propriétés de formage à froid dues à une écrouissabilité élevée
- Mauvaise usinabilité
- Plus difficile à souder
- Moins chères que les Austénitiques Cr-Ni... mais plus que les ferritiques Cr

Principalement
utilisées en Inde
et en Chine

Les nuances au Cr (Ferritiques)⁶

Sous-groupes :

▪ Cr	Typiquement EN 1.4016/AISI 430	Cr : 17			Fe : Complément
▪ Cr-Mo	Typiquement EN1.4521/AISI 444	Cr : 18	Mo : 2	Ti+Nb : 0,4	Fe : Complément

Propriétés communes :

- Insensibles à la CSC (Corrosion sous Contrainte)
- Bonne ductilité (bien que plus faible que celle des nuances austénitiques)
- Ne conviennent pas pour des utilisations à très basses températures
- La résistance mécanique peut être quelque peu augmentée par écrouissage (mais pas par traitement thermique)
- Très bonnes propriétés de formage à froid : moins de retour élastique, moins d'usure des outils mais l'allongement plus faible exige un procédé d'emboutissage différent de celui des nuances austénitiques
- Les nuances stabilisées (c'est-à-dire avec Nb et/ou Ti) sont très faciles à souder (TIG, MIG)

Offrent un rapport performance/coût optimal pour de nombreuses applications et sont de plus en plus utilisées

Les nuances Cr (Martensitiques)⁷

Sous-groupes :

▪ C-Cr	Typiquement EN1.4021/AISI 420	Cr : 13	C : 0,2		Fe : Complément
▪ C-Cr-Ni	Typiquement EN1.4057/AISI431	Cr : 16	Ni : 2	C : 0,2	Fe : Complément
▪ A durcissement par précipitation	Typiquement EN1.4542/AISI630	Cr : 17	Ni : 4	Cu : 4	Fe : Complément

Propriétés communes :

- Résistance à la corrosion correcte à bonne et qui augmente avec la teneur en alliage
- Haute résistance mécanique obtenue par traitement thermique (et non pas par formage à froid). Capacité d'allongement limitée.
- Ne conviennent pas pour les utilisations à très basses températures
- Impropres au formage, souvent mis en œuvre par usinage
- Peuvent être soudées (TIG, MIG) mais exigent généralement un traitement thermique post-soudage

Utilisées comme
aciers de construction
mécanique résistants
à la corrosion

Les Duplex (Austénitiques-Ferritiques)⁸

Sous-groupes :

▪ Cr-Ni	Typiquement EN1.4362	Cr : 23	Ni : 4		Fe : Complément
▪ Cr-Ni-Mo	Typiquement EN1.4462	Cr : 22	Ni : 5	Mo : 3	Fe : Complément

Propriétés communes :

- Excellente résistance à la corrosion qui augmente avec la teneur en alliage
- Insensibles à la CSC (Corrosion sous Contrainte)
- Haute résistance mécanique, bonne ductilité
- La résistance peut être améliorée par écrouissage (mais pas par traitement thermique)
- Bonnes caractéristiques de formage à chaud ou à froid (ductilité, allongement)
- Soudable (TIG, MIG)

Offrent la meilleure
combinaison résistance
à la corrosion et
propriétés mécaniques

Propriétés physiques^{9, 10}

Matériaux	Module d'élasticité GPa	Coefficient de dilatation thermique $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Conductivité thermique $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Magnétique	Densité
Austénitiques Cr-Ni	210	18	15	Non	7.8
Austénitiques Cr-Mn	210	17	15	Non	7.8
Ferritiques Cr	220	11	23	Oui	7.7
Duplex Cr-Ni (Mo)-N	210	14	15	Intermédiaire	7.8
Martensitiques Cr-C	215	11	30	Oui	7.7
Acier au carbone	210	12	18	Oui	7.8
Cuivre	135	17	380	Non	8.3
Aluminium	70	22	230	Non	2.7
Verre	65	9	1,7	Non	2.5
Béton	48	10	1	Non	2.5

Normes pour les aciers inoxydables

Principales normes internationales :

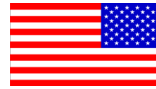
ISO



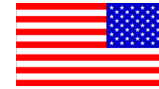
EN



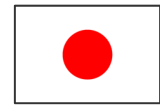
ASTM/AISI



UNS



JIS



Notes :

La plupart des pays se réfèrent aux normes ci-dessus qui sont largement admises.
Un grand nombre de nuances sont très similaires dans toutes ces normes.

Liste des normes américaines : réf. 11

Liste des normes européennes : réf. 12

Des tableaux de correspondance sont disponibles : réf. 13 – 15

Principales nuances pour l'Architecture, le Bâtiment et la Construction :

EN 10088-4 (tôles/plaques/bandes)^{16, 17}

Nuance	ASTM UNS	C Poids %	Cr Poids %	Ni Poids %	Mo Poids %	Autre	Utilisation typique ^{3,4}
4003	S40977	0,02	11,5	0,5	-	-	Intérieurs chauffés ou non
4016	430	0,04	16,5	-	-	-	Revêtement intérieur décoratif
4509	S43932	0,02	18	-	-	Nb, Ti	Toitures (sauf milieu marin), souvent étamées pour la patine, et évacuation des eaux de pluie
4510	439	0,02	17	-	-	Ti	
4521	444	0,02	17,8	-	2,1	Ti	Installations sanitaires
4301	304	0,04	18,1	8,1	-	-	Intérieurs et extérieurs de bâtiments en atmosphères industrielles normales et éloignés des côtes
4307	304L	0,02	18,1	8,1	-	-	
4306	304L	0,02	18,2	10,1	-	-	
4401	316	0,04	17,2	10,1	2,1	-	Applications sous humidité permanente, zones côtières, atmosphères industrielles polluées ou près de routes où des sels de déverglaçage peuvent être utilisés
4404	316L	0,02	17,2	10,1	2,1	-	
4571	316Ti	0,04	16,8	10,9	2,1	Ti	
4529	N08926	0,01	20,5	24,8	6,5	N, Cu	Tunnels routiers et intérieur de piscines
4547	S31254	0,01	20,0	18,0	6,1	N, Cu	

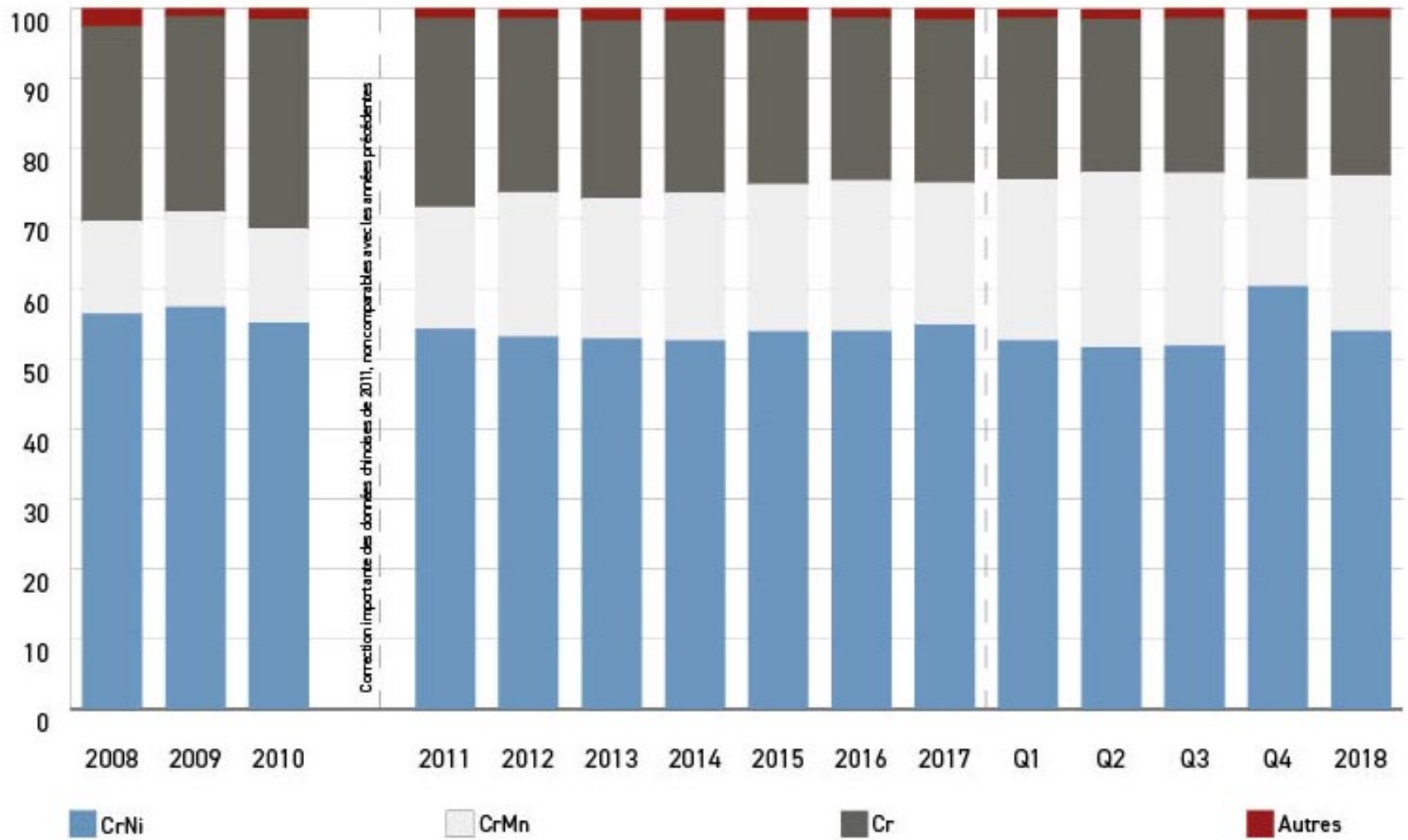
Principales nuances pour l'Architecture, le Bâtiment et la Construction :

EN 10088-5 (barres/fils/profilés)¹⁸

Nuance	ASTM UNS	C Poids %	Cr Poids %	Ni Poids %	Mo Poids %	Autres	Utilisation typique ⁶
4003	S40977	0,02	11,5	0,5	-	-	
4016	430	0,04	16,5	-	-	-	Crochets d'ardoises
4542	630	0,04	16,0	4,0		Cu, Nb	Tirants et pièces mécaniques
4301	304	0,04	18,1	8,1	-	-	Ronds à béton Fixations A2
4307	304L	0,02	18,1	8,1	-	-	
4311	304N	0,02	18,1	8,6	-	N	
4567	304Cu	0,02	17,1	8,6	-	Cu	
4401	316	0,05	16,6	10,1	2,1	-	Intérieurs et extérieurs de bâtiments en atmosphères industrielles normales et éloignés des côtes Ronds à béton
4404	316L	0,02	16,6	10,1	2,1	-	
4429	« 316LN »	0,02	16,6	11,1	2,6	N	
4529	« 926 »	0,01	20,5	24,8	6,5	N, Cu	Tunnels routiers et intérieur de piscines
4547	S31254	0,01	20,0	18,0	6,1	N, Cu	
4362	S32304	0,02	22,5	3,6	0,3	N, Cu	Ronds à béton et pièces mécaniques
4462	S32205	0,02	21,5	4,6	2,8	N	Ronds à béton et pièces mécaniques

Répartition de la production mondiale d'acier inoxydable par familles¹⁹

Actualisé !



Les prix élevés du Ni favorisent le remplacement des nuances au Cr-Ni courantes par des nuances au Cr-Mn ou au Cr

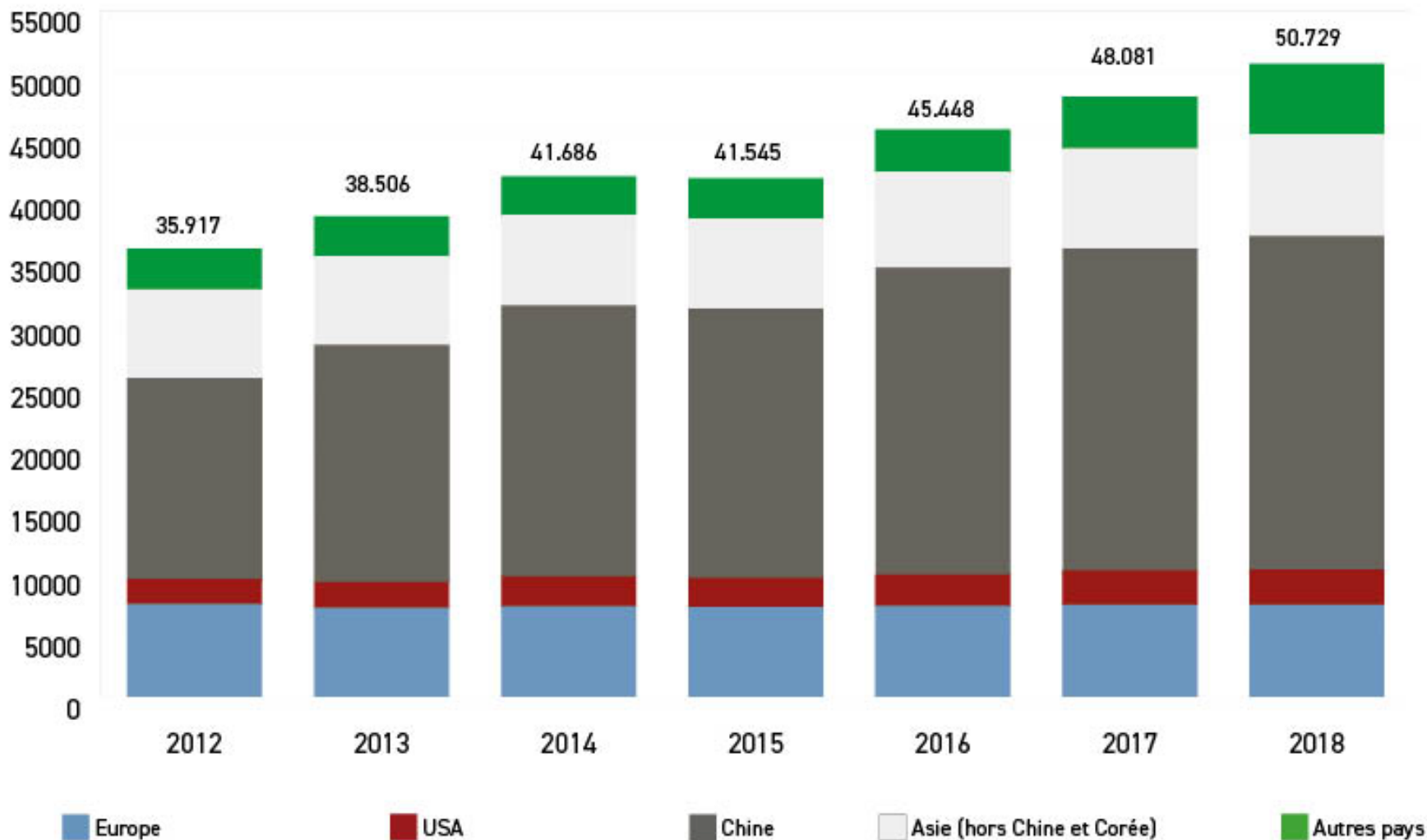
Les nuances Duplex, marginales aujourd'hui, devraient progresser dans le futur

Production mondiale d'acier inoxydable par zones géographiques²

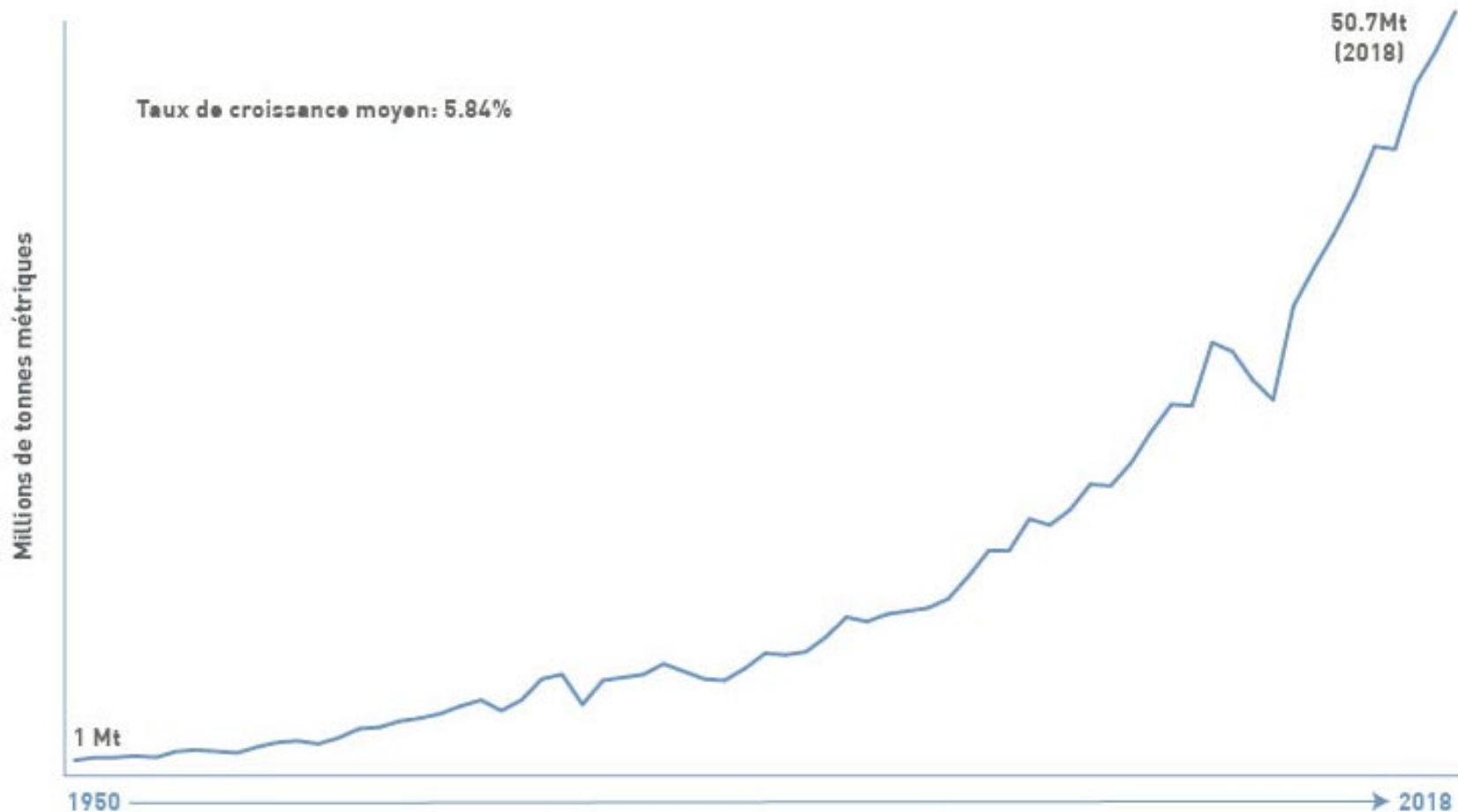
Actualisé

La demande est croissante

Production brute inox (équivalent brame/ingot) par région en milliers de tonnes métriques
Autres pays: Brésil, Russie, Afrique du Sud, Corée du Sud, Indonésie

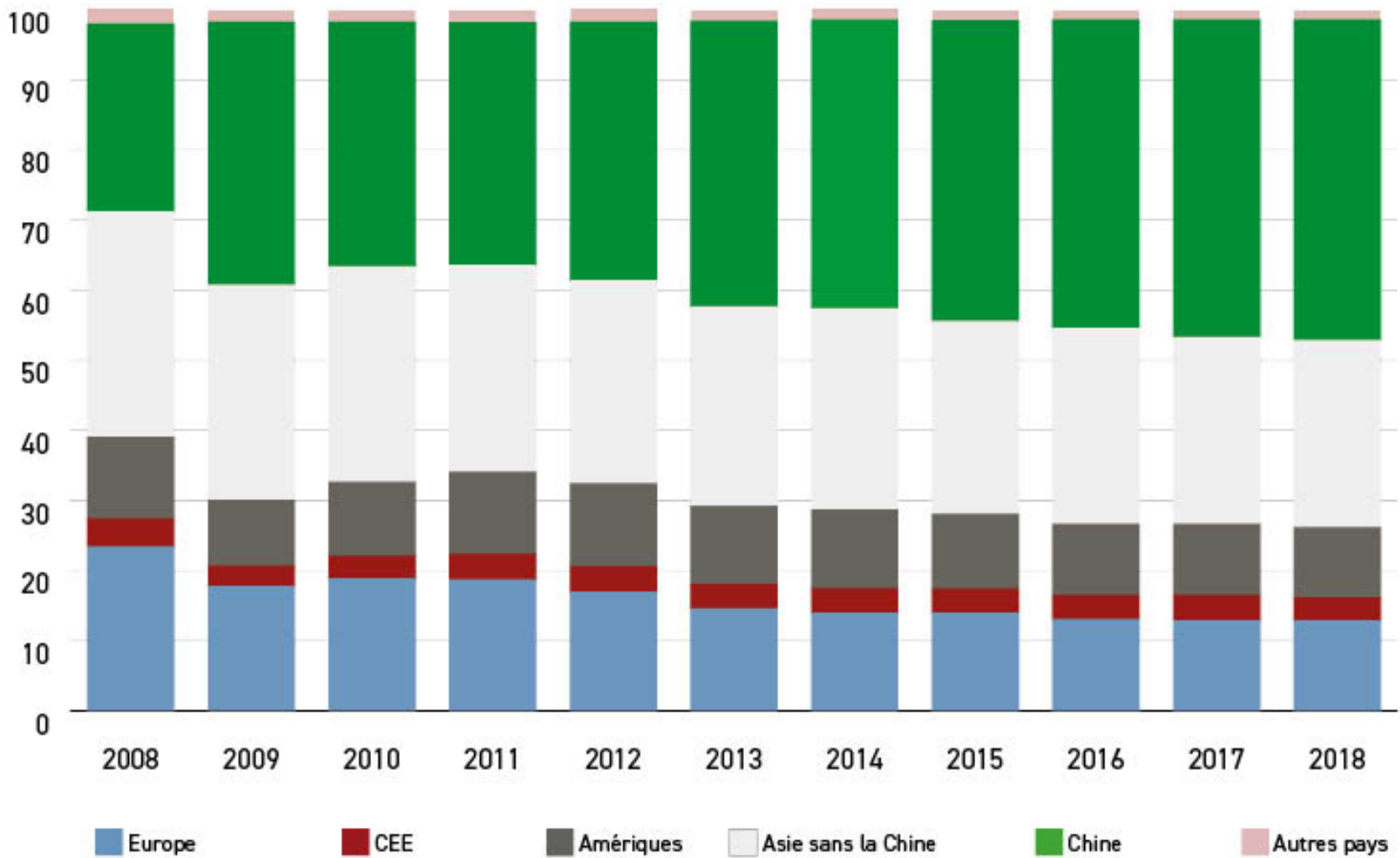


Taux de croissance annuel moyen mondial Production brute d'inox²² (Millions de tonnes métriques)



**ACTUALISÉ
2019 !**

Utilisation apparente d'inox par région



Références (1/2)

1. <https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/TheStainlessSteelFamily.pdf>
2. <http://www.outokumpu.com/en/stainless-steel/about-stainless-steel/stainless-steel-types/pages/default.aspx>
3. D. Peckner Handbook of Stainless Steels Hardcover – June, 1977 ISBN-13: 978-0070491472 ISBN-10: 007049147X
4. http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Austenitics.pdf
5. New « 200 series steels »: An opportunity or a threat to the image of stainless steel?
https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSFNew200seriessteelsAnopportunityorathreat_EN.pdf
6. The ferritic solution http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_The_Ferritic_Solution_French.pdf
7. Martensitic stainless steels http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Martensitic_Stainless_Steels.pdf
8. Duplex stainless steels: <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/structural-duplex-stainless.php?d=1>
9. https://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/CapabilitiesandLimitationsofArchitecturalMetalsandMetalsforCorrosionResistancel_14057a_.pdf
10. http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Tables_TechnicalProperties_EN.pdf
11. http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/2014-8-Specification-and-Guideline-list.pdf
12. <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=370&featured=1>
13. <https://www.worldstainless.org/about-stainless/what-is-stainless-steel/standards/>

Références (2/2)

14. Chemical composition of stainless steel flat products for general purposes to EN 10088-2: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=44>
15. Chemical composition of stainless steel long products for general purposes to EN 10088-3: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=46>
16. EN 10088-4:2009 Stainless steels. Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for construction purposes [www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro Inox/EN10088-4 EN.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro%20Inox/EN10088-4_EN.pdf)
17. Stainless steel flat products for building – the grades in EN 10088-4 explained: [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro Inox/EN10088-4 FR.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro%20Inox/EN10088-4_FR.pdf)
18. EN 10088-5: 2009 Stainless steels. Technical delivery conditions for bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for construction purposes.
19. ISSF publication « Stainless steel in Figures »: [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF Stainless Steel in Figures 2019 English public version.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF%20Stainless%20Steel%20in%20Figures%202019%20English%20public%20version.pdf)

Merci !

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




Module 5 :
Résistance à la corrosion des
aciers inoxydables

Contenu

1. La plupart des matériaux se dégrade avec le temps
2. Pourquoi est-ce que l'acier inoxydable résiste à la corrosion ?
3. Types de corrosion des aciers inoxydables
4. Comment choisir l'acier inoxydable adapté au niveau de résistance à la corrosion recherché ?
 - Applications structurales
 - Autres applications
5. Références

1. La plupart des matériaux se dégrade
avec le temps




La plupart des matériaux se dégrade avec le temps

Matériau	Bois	Acier	Béton
			
Types de dégradation	<p>Champignons</p> <p>Insectes</p> <p>Soleil & pluie</p>	<p>Rouille</p>	<p>Fissures/Écaillage</p>
Mesures correctives	<p>Chimiques</p> <p>Peintures/vernis</p>	<p>Galvanisation</p> <p>Peinture</p>	<p>Armatures résistantes à la corrosion</p>

La plupart des matériaux se dégrade avec le temps

Matériau	Pierre	Verre	Polymères
			
Types de dégradation	Usure Dommages dus à la pollution	Bris	Deviennent fragiles sous les UV
Mesures correctives	Généralement aucune n'est prise	Verre trempé	Polymères plus résistants

La plupart des matériaux se dégrade avec le temps

Matériau	Aluminium*	Cuivre	Acier inoxydable
			
Types de dégradation	Piqûres avec le temps, corrosion galvanique possible	Forme une patine verte avec le temps	Aucune dégradation
Mesures correctives	La corrosion galvanique peut être empêchée	Aucune	Inutile

* Les aluminium forment une mince couche d'oxydes protectrice, exactement comme l'acier inoxydable, mais avec une résistance à la corrosion beaucoup plus faible

La corrosion du béton armé

(les problèmes de corrosion ne sont pas limités aux surfaces extérieures !)



Image courtesy of Arminox Stainless



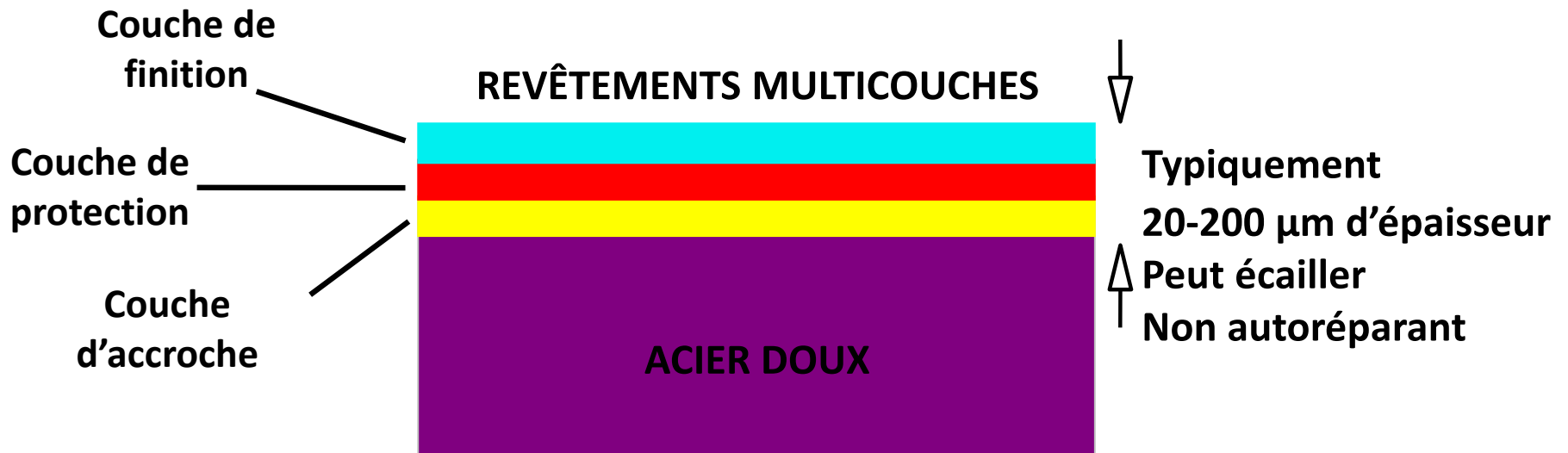
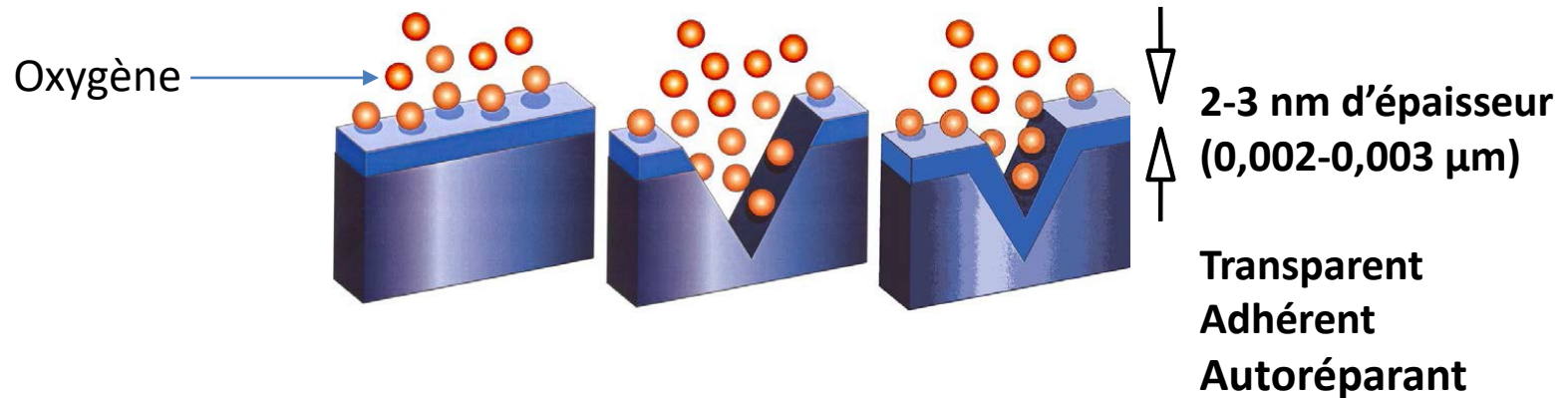
Les aciers inoxydables fournissent à la fois résistance mécanique et résistance à la corrosion au sein du béton, assurant une longue vie à la structure et cela sans entretien.

- La corrosion de l'acier au carbone non protégé se développe à l'intérieur même des structures en béton armé car les chlorures présents dans l'environnement (sels marins/sels de déverglaçage...) diffusent à l'intérieur du béton.
- Le volume des produits de corrosion (rouille) est plus grand que celui du métal lui-même, créant, en gonflant, des contraintes de traction qui provoquent un écaillage de la peau du béton.
- Il faut donc essayer d'atténuer la corrosion des armatures dans le béton.
- Des techniques variées sont utilisées : enrobage plus épais, protection cathodique, membranes, revêtements époxy... et **le recours à l'inox** plutôt qu'à l'acier au carbone.

2. Pourquoi est-ce que l'acier inoxydable résiste à la corrosion ?

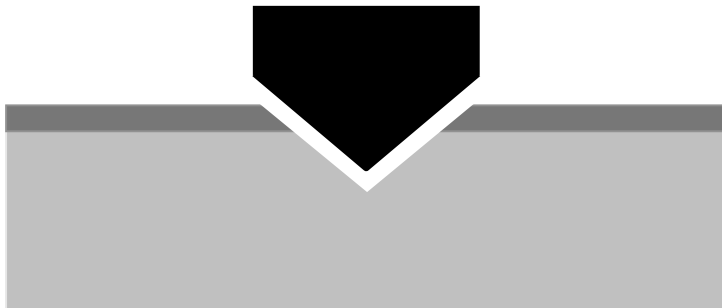
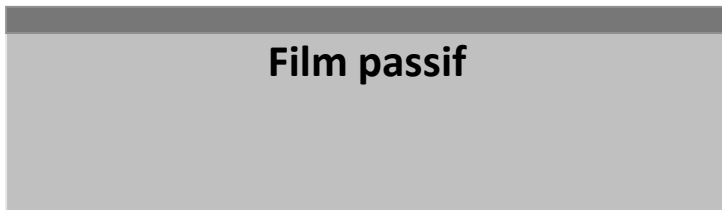
Couche passive ou revêtements

FILM PASSIF sur L'ACIER INOXYDABLE : Oxyhydroxydes de Fe et de Cr

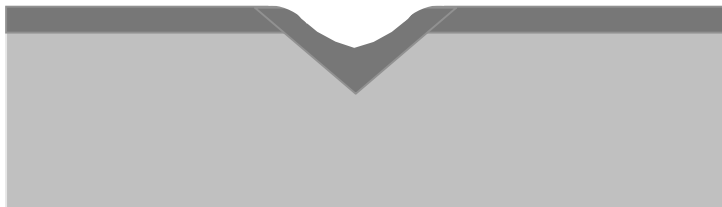


Dommmages de la couche protectrice

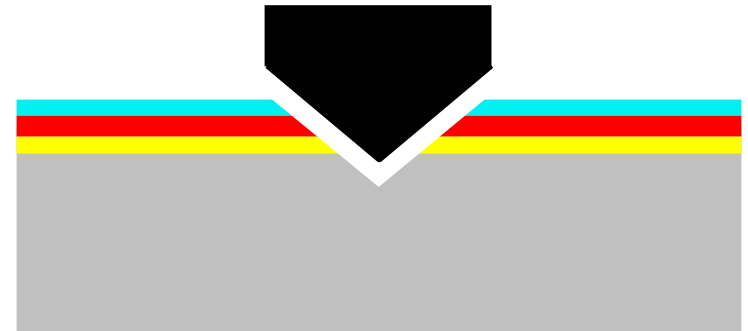
Acier inoxydable



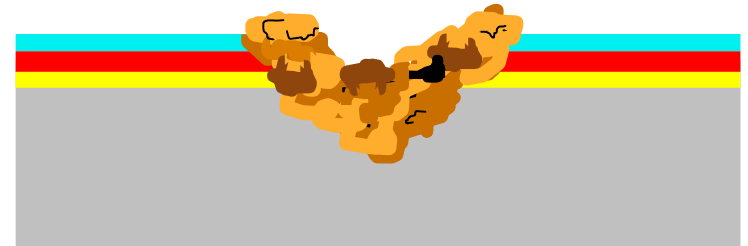
Autoréparant



Acier doux



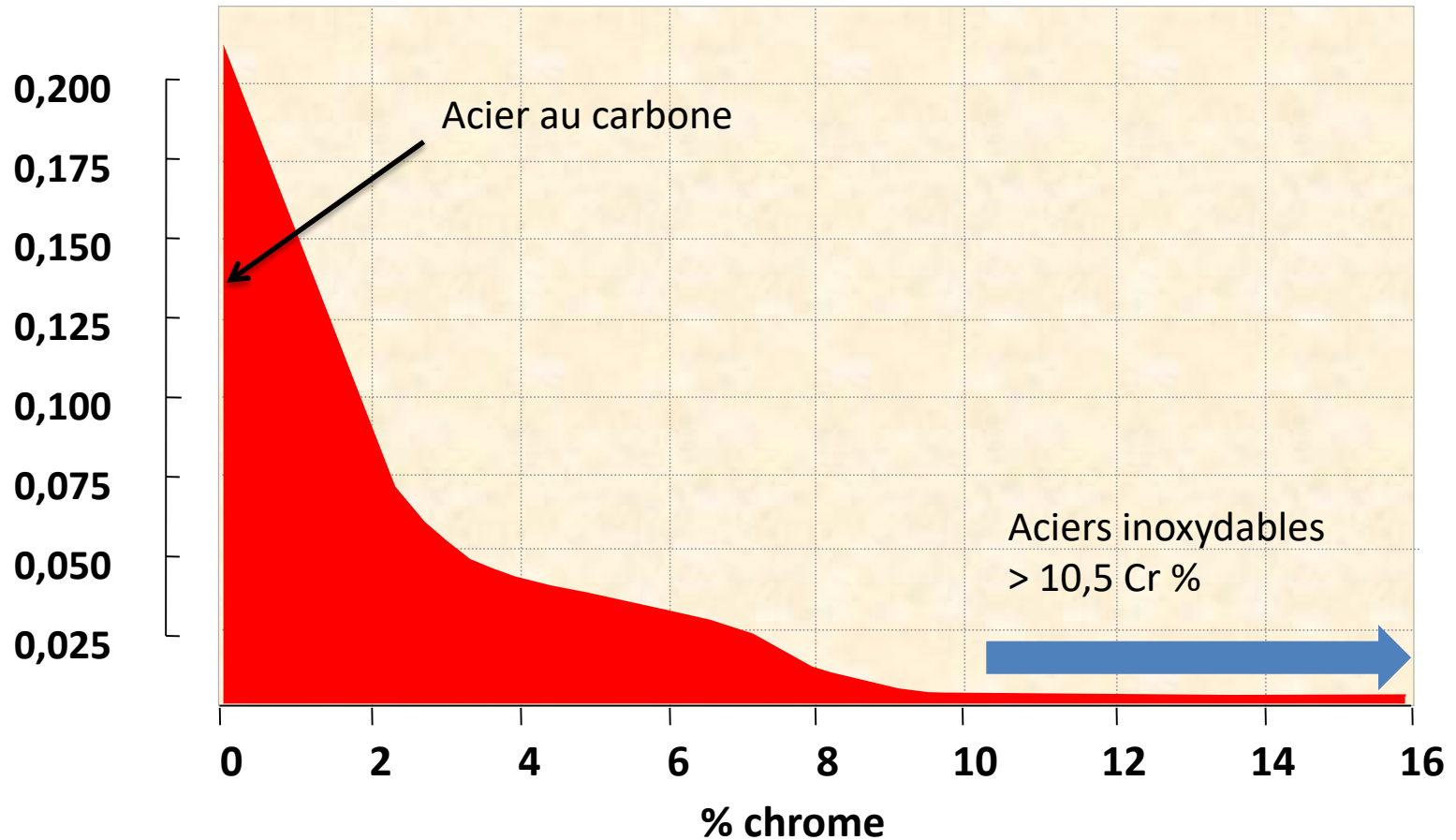
Produits de corrosion



3. Types de corrosion des aciers inoxydables

Effets de la teneur en chrome sur la résistance à la corrosion atmosphérique (corrosion uniforme)

Perte de masse (mm/an)



Lorsque le choix de la nuance d'acier inoxydable n'a pas été fait correctement, la corrosion peut se produire

... aucun matériau n'est parfait !

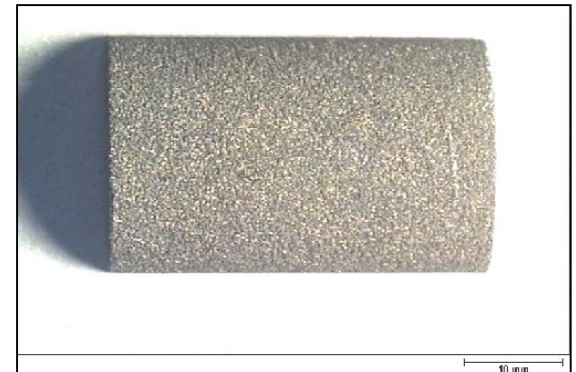
Pensez-y comme pour choisir un véhicule adapté à une utilisation donnée

Types de corrosion des aciers inoxydables

- a) Généralisée
- b) Par Piqûres
- c) Caverneuse
- d) Galvanique
- e) Intergranulaire
- f) Corrosion sous Contrainte

a) Qu'est-ce que la corrosion généralisée ?

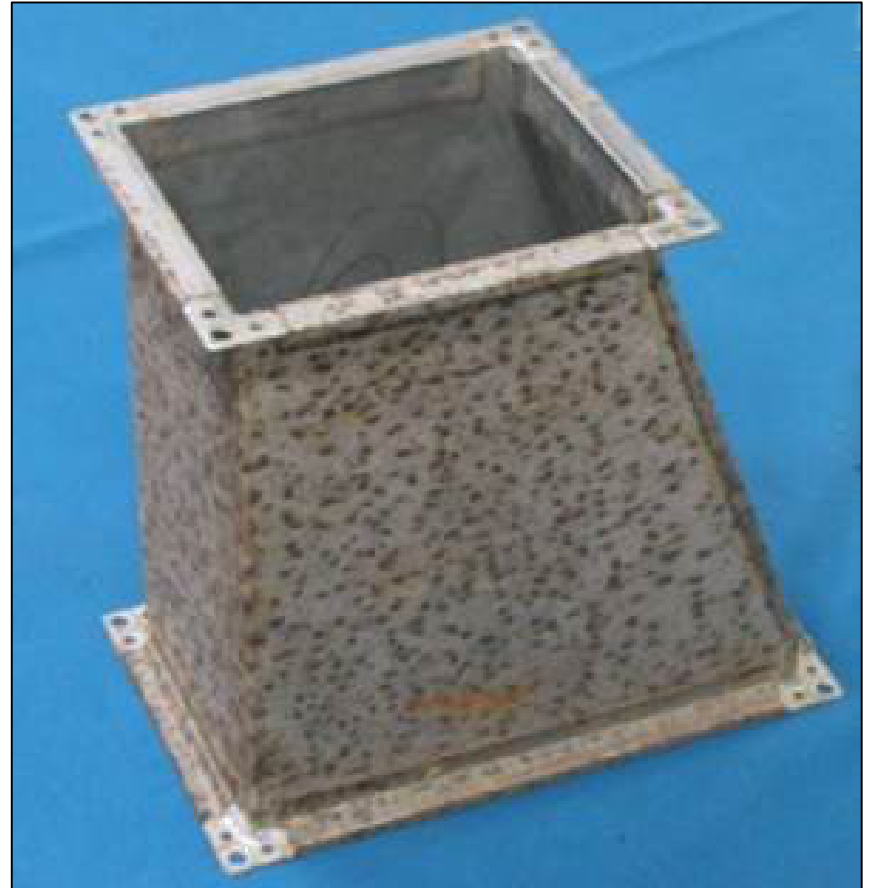
- Lorsque le film passif est détruit par un environnement agressif, l'ensemble de la surface se corrode uniformément et la perte d'épaisseur de métal peut s'exprimer en $\mu\text{m}/\text{an}$
- C'est typiquement le cas des aciers au carbone non protégés.
- Dans l'industrie du bâtiment, cela ne se produit pas avec les aciers inoxydables car les conditions de corrosion ne sont jamais suffisamment agressives (il faudrait une immersion dans un acide fort)



b) Qu'est-ce que la corrosion par piqûres^{1,2,3,7} ?

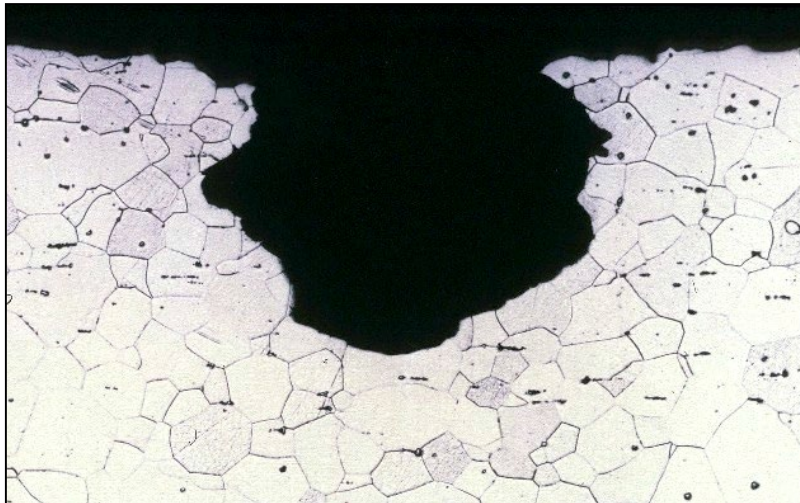
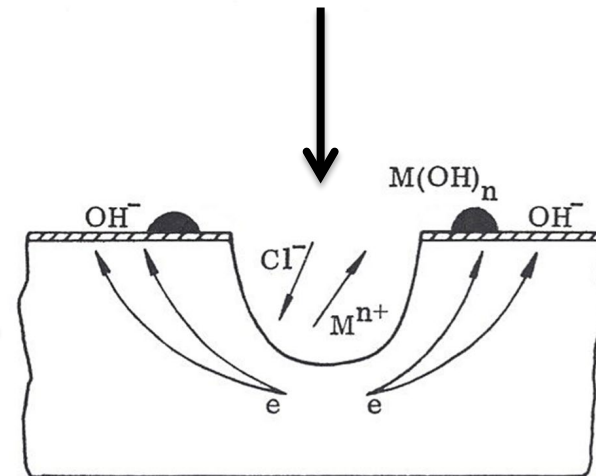
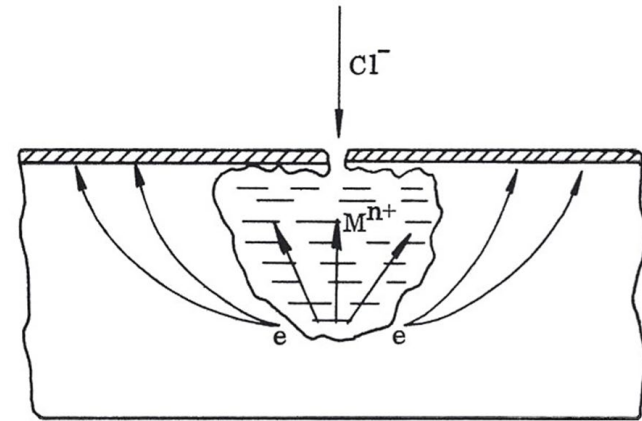
La corrosion par piqûres (ou piqûres) est une forme de corrosion extrêmement localisée qui conduit à la création de petites perforations dans le métal.

Cette image montre des piqûres sur un acier inoxydable EN 1.4310 (AISI 301) résultant d'une résistance à la corrosion insuffisante en environnement chloré très agressif.



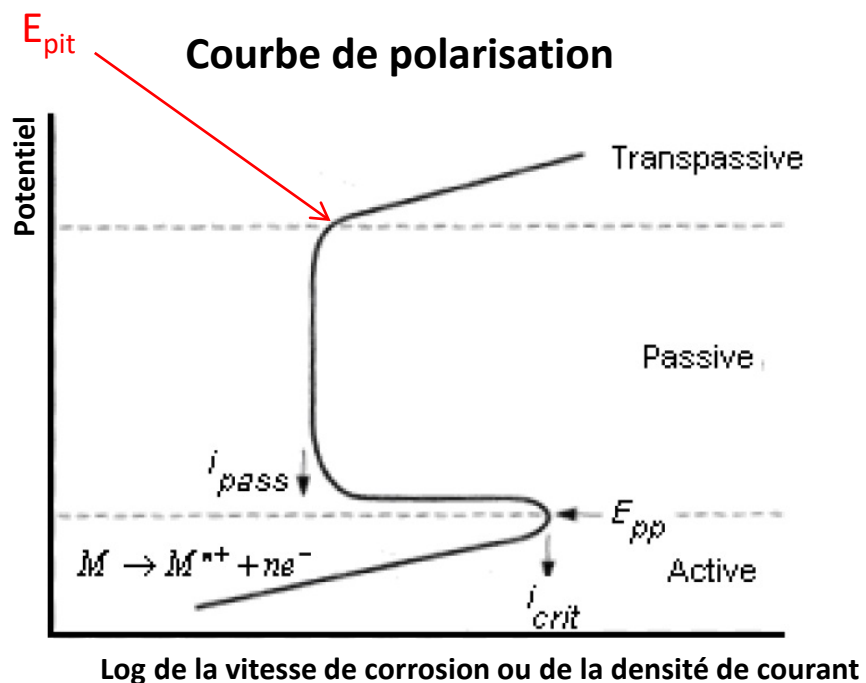
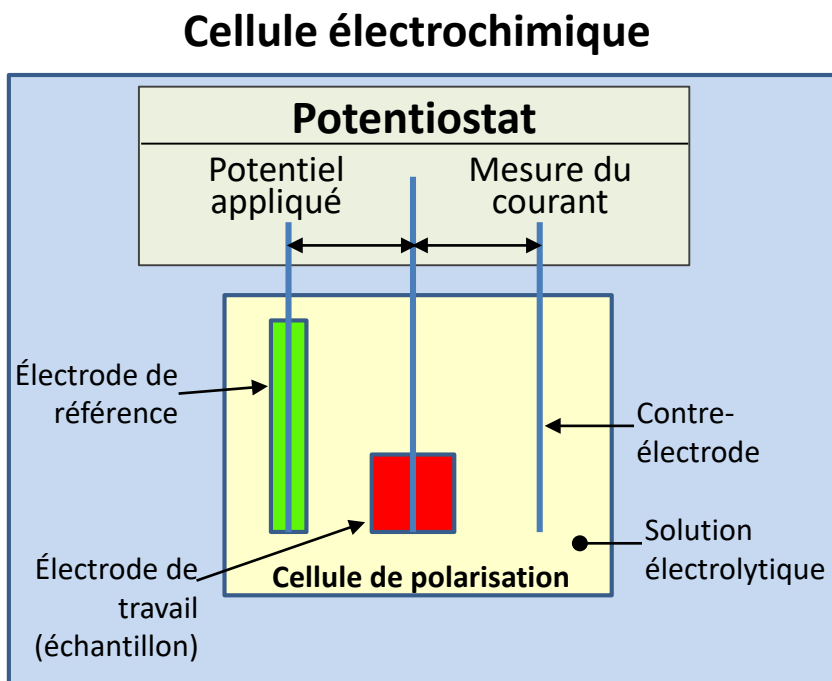
Mécanismes de corrosion par piqûre

1. Déclenchement à partir d'une très petite surface sur des irrégularités ou des inclusions non métalliques
2. La corrosion se propage en fond de piqûre du fait de réactions électrochimiques qui ne sont pas bloquées par la repassivation



La piqûration peut être reproduite dans une cellule électrochimique⁴

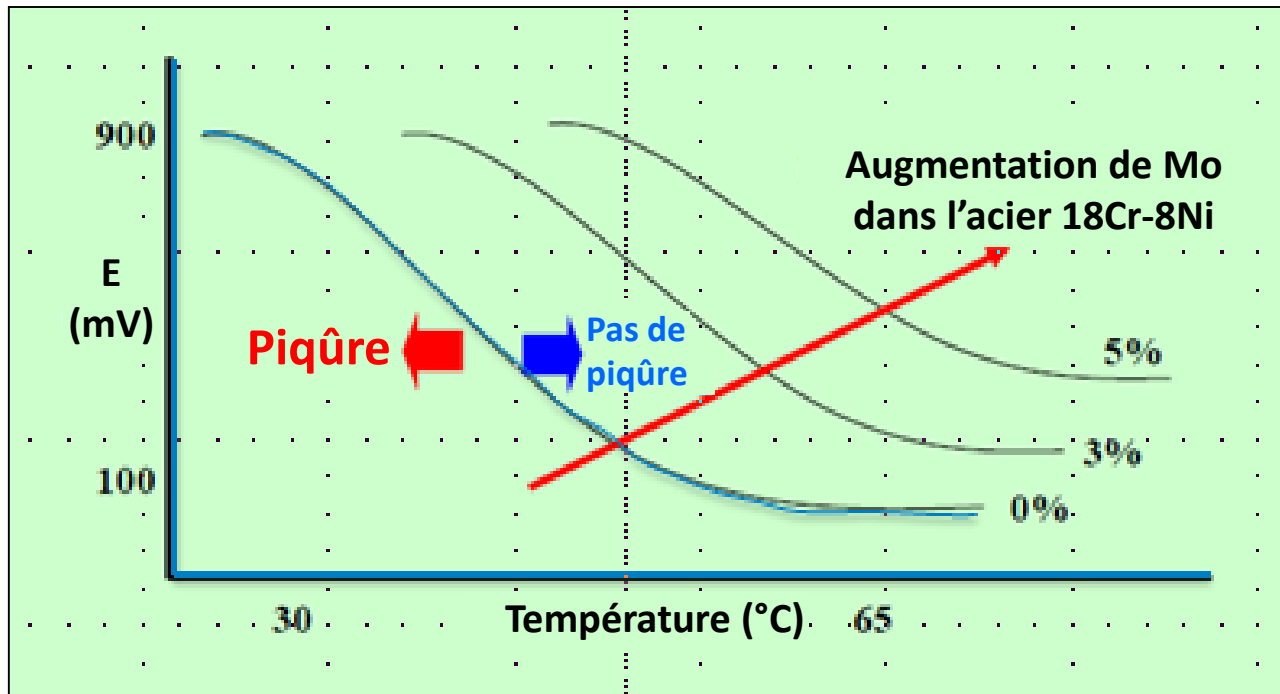
- La corrosion entraîne la dissolution du métal, c'est-à-dire un processus avec :
 - a) des réactions électrochimiques à la surface métal
 - b) Un courant électrique entre le métal corrodé (l'anode) et une partie cathodique
- Ces phénomènes peuvent être simulés dans une cellule électrochimique, un appareil qui permet d'étudier les processus de corrosion



Facteurs principaux influençant la corrosion par piqûres¹

(le potentiel de piqûre E_{pit} est généralement utilisé comme critère de déclenchement)

1. Température



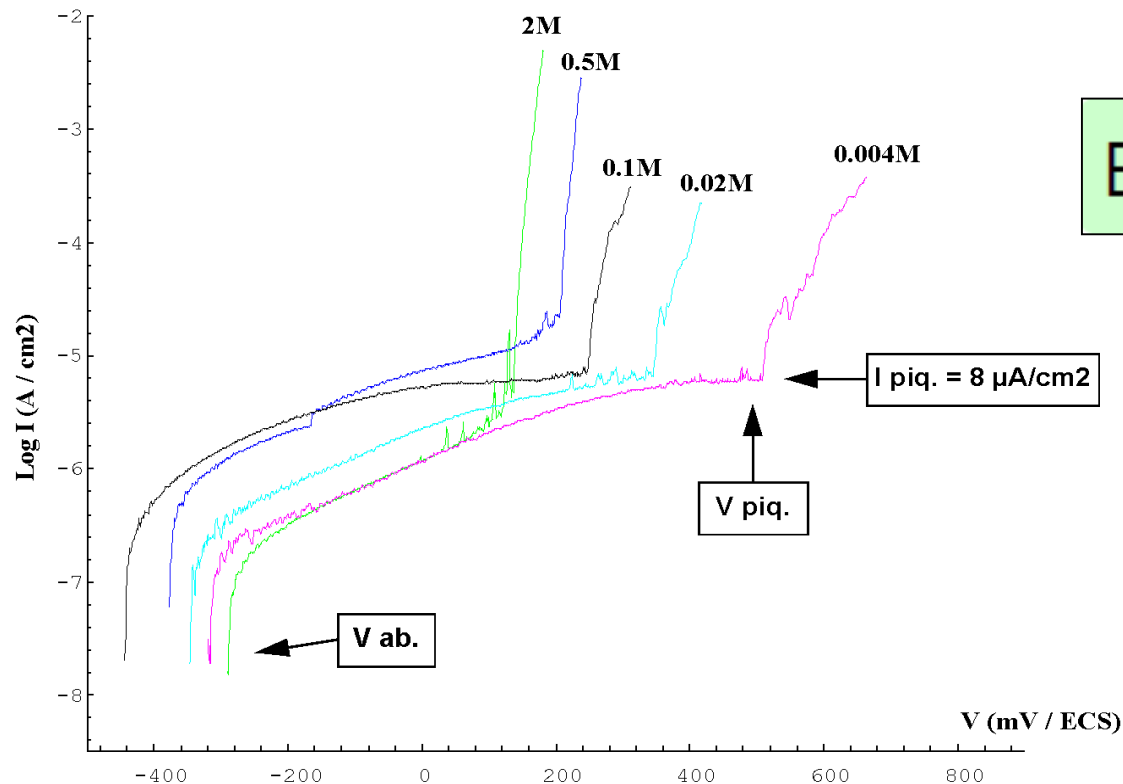
L'accroissement de la température réduit sévèrement la résistance à la corrosion par piqûre.

Facteurs principaux influençant la corrosion par piqûres⁵

(le potentiel de piqûre E_{pit} est généralement utilisé comme critère de déclenchement)

2. Concentration en chlorures

La résistance aux piqûres diminue lorsque la concentration en Cl^- augmente (en fonction du log de la concentration en Cl^-)



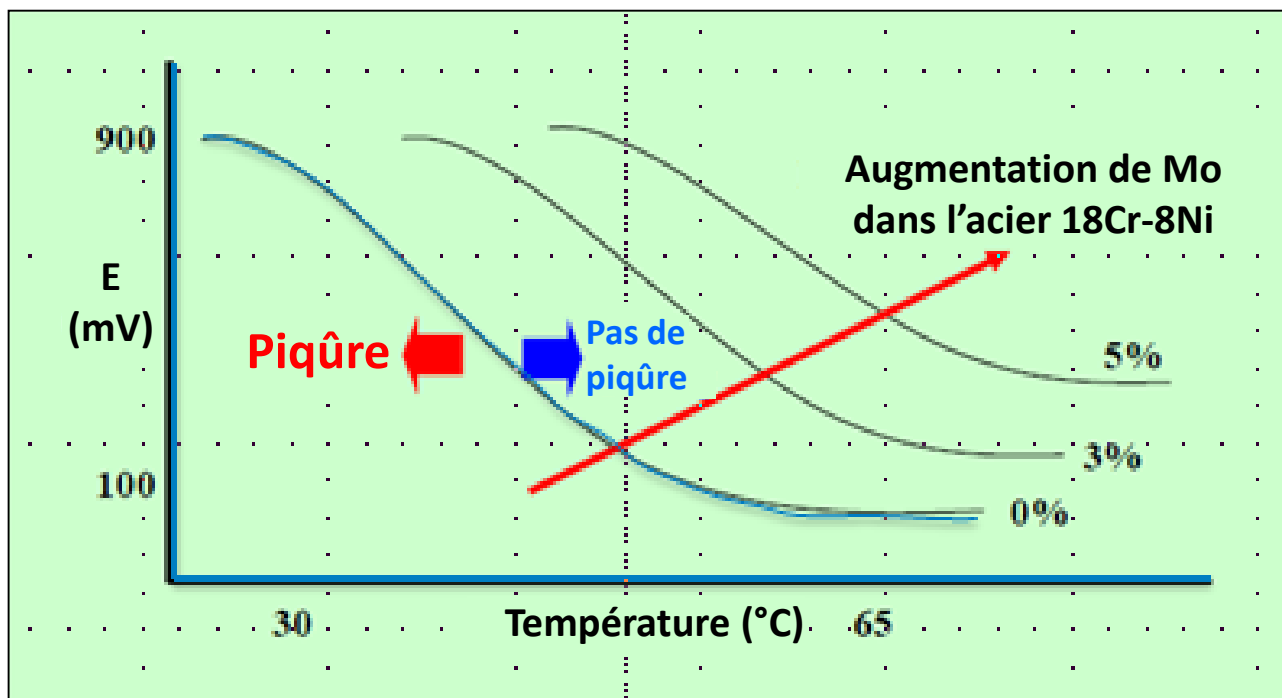
$$E_{\text{pit}} = A \log [\text{Cl}^-] + B$$

Facteurs principaux influençant la corrosion par piqûres¹

(le potentiel de piqûre E_{pit} est généralement utilisé comme critère de déclenchement)

3. Analyse de l'acier inoxydable

La résistance aux piqûres augmente fortement avec l'ajout de certains éléments d'alliage : N, Mo, Cr



Le rôle des éléments d'alliage est décrit par l'indice de résistance à la piqûre (PREN qui vient de l'anglais : Pitting Resistance Equivalent Number)

Indice de résistance à la piquûre (PREN*)⁶

Revue en
2019

- En calculant le PREN, il est possible de comparer la résistance à la piquûre des diverses nuances d'aciers inoxydables. Plus le PREN est grand, meilleure est la résistance à la corrosion.
- Clairement, le PREN seul ne peut pas permettre de prédire si une nuance particulière peut être utilisée pour une application donnée

$$\text{PREN} = \text{Cr} + 3,3\text{Mo} + 16\text{N}$$

où :

Cr = teneur en chrome

Mo = teneur en molybdène

N = teneur en azote

EN	AISI	PREN
1.4003	-	10.5 - 12.5
1.4016	430	16.0 - 18.0
1.4301	304	17.5 - 20.8
1.4311	304LN	19.4 - 23.0
1.4401/4	316/L	23.1 - 28.5
1.4406	316LN	25.0 - 30.3
1.4439	317L	31.6 - 38.5
1.4539	-	32.2 - 39.9
1.4362	-	23.1 - 29.2
1.4462	-	30.8 - 38.1
1.4410	-	40
1.4501	-	40

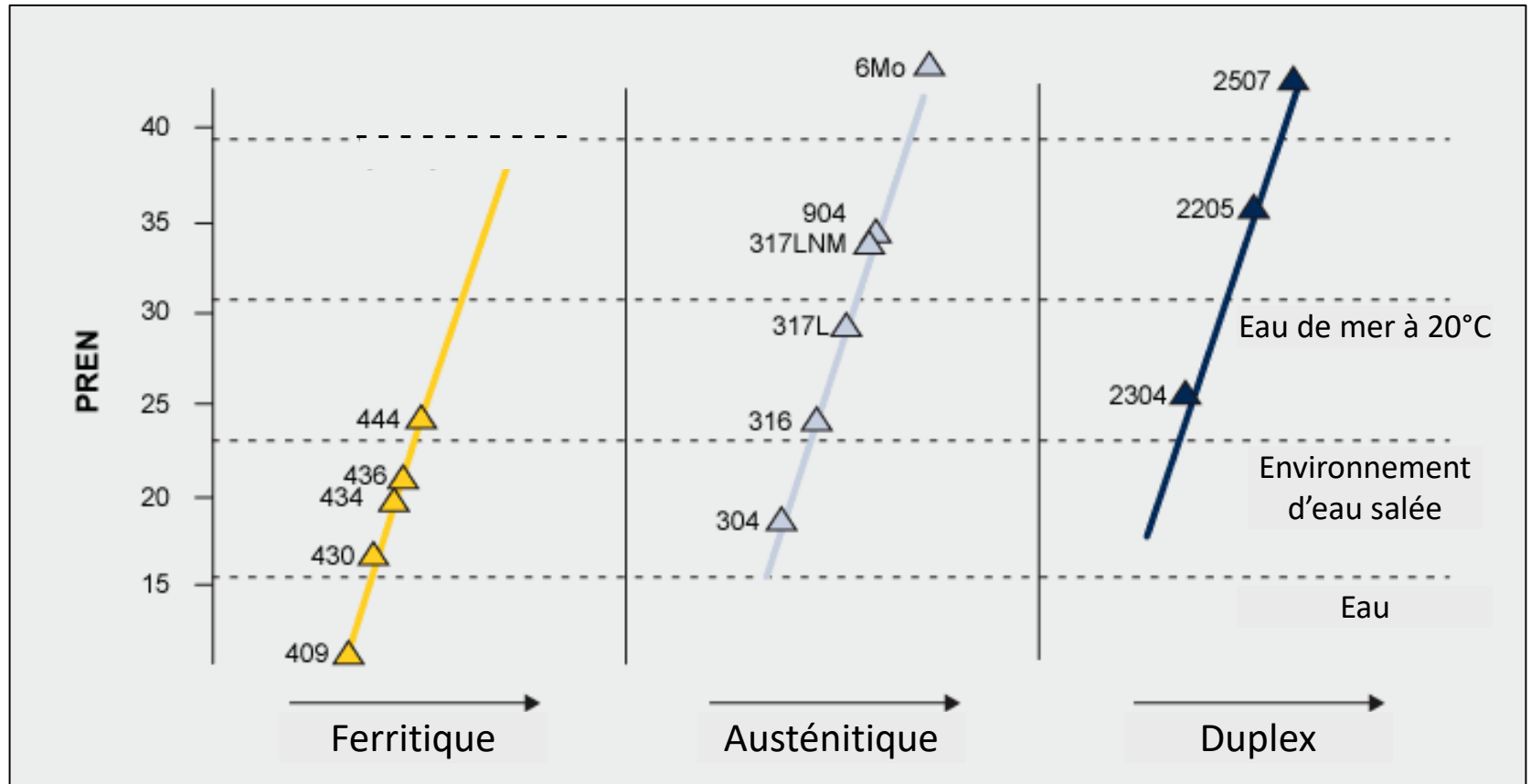
Notez que le PREN ne fait pas intervenir Ni.

La résistance à la piquûre ne dépend pas de la teneur en Nickel. Voir diapo suivante

*PREN : « Pitting Resistance Equivalent Number »

PREN de quelques nuances courantes⁹

Revue en 2019



Les inox ferritiques sont comparables aux inox austénitiques 304 et 316 en ce qui concerne la résistance à la piqûre.

Note : voir l'Annexe pour les désignations des normes EN

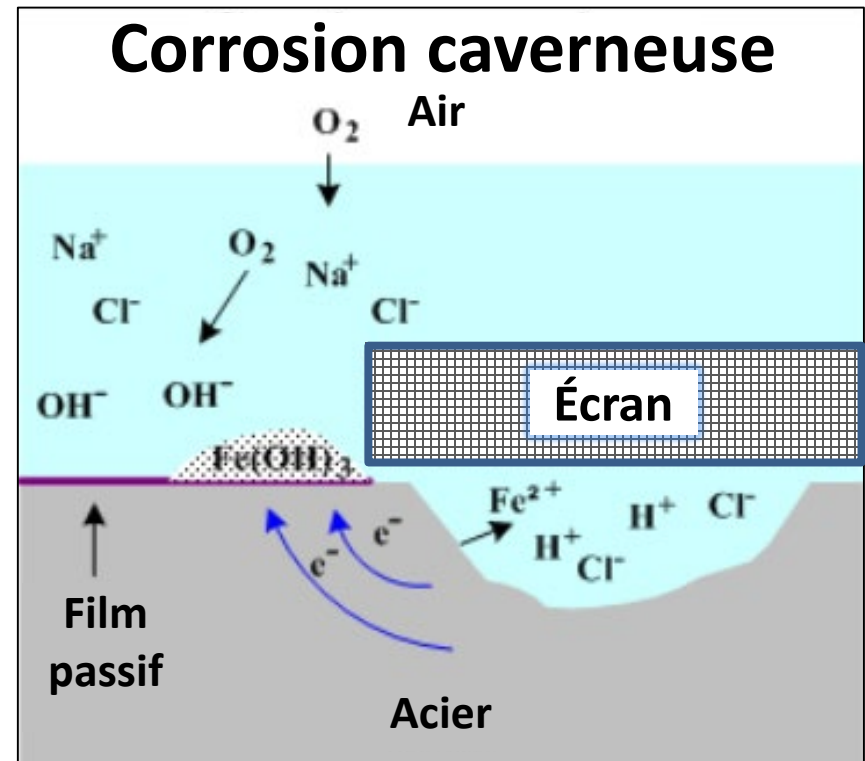
c) Qu'est-ce que la corrosion caverneuse¹ ?

La corrosion caverneuse correspond à la corrosion qui se produit dans les espaces confinés où l'accès du fluide actif issu de l'environnement est limité. Ces espaces sont généralement appelés cavernes.

Exemples de cavernes: interstices entre pièces en contact, dans les joints ou les scellements, à l'intérieur des fissures et des soudures, sous des dépôts ou des boues.

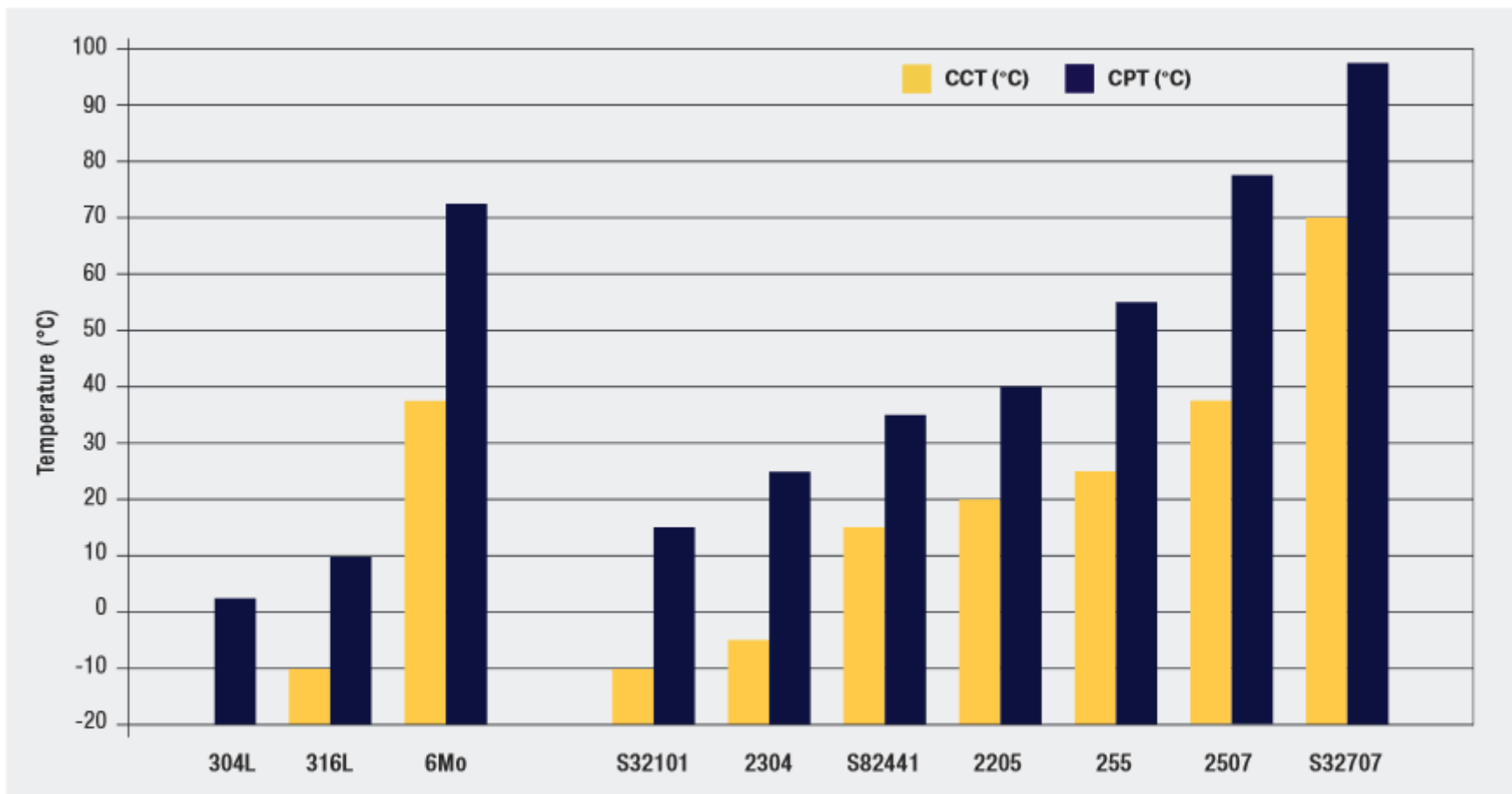
Mécanismes de la corrosion caverneuse

- Au départ, il n'y a aucune différence entre la cavité et la surface dans son ensemble
- Les choses changent lorsque la cavité se trouve appauvrie en oxygène
- Un ensemble de réactions électrochimiques se produit dans la caverne causant une augmentation de la concentration en Cl^- et la diminution du pH local, jusqu'à ce que la passivation ne puisse plus se produire
- Alors le métal dans la caverne subit une corrosion uniforme



Température critique de résistance aux piqûres (CPT) Température critique de résistance à la corrosion caverneuse (CCT) pour différentes nuances austénitiques & duplex⁸

Note : Plus la température critique est élevée, meilleure est la résistance à la corrosion



Températures critiques de corrosion caverneuse et par piqûre pour de l'acier inoxydable austénitique sans soudure (barres de gauche) et duplex (barres de droite) à l'état recuit (évaluée à 6 % de chlorure ferrique par l'ASTM G 48).

Note : voir l'Annexe pour les désignations des normes EN

Comment éviter la corrosion caverneuse ?

1. Optimiser la conception :
 - a) Utiliser des pièces soudées
 - b) Éliminer les zones de rétention de liquides (drainer par exemple)
2. Nettoyer pour éviter les dépôts (dans la mesure du possible)
3. Choisir un acier inoxydable résistant convenablement à la corrosion (voir la partie 4 de ce module)

d) Qu'est-ce que la corrosion galvanique¹ ? (connue aussi sous le nom de corrosion bimétallique)



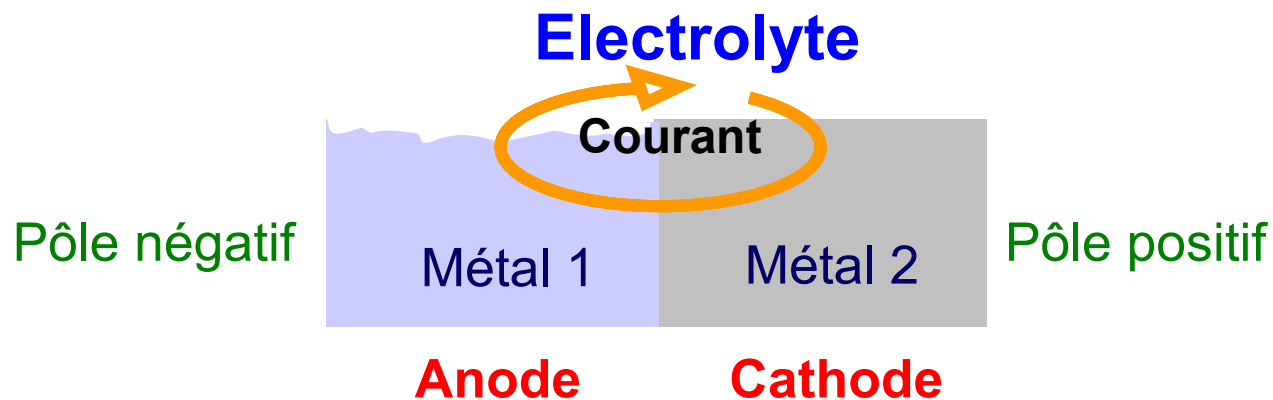
C'est la corrosion qui se produit lorsque 2 métaux qui possèdent des potentiels galvaniques très différents sont en contact.

Le métal qui correspond à l'anode est attaqué

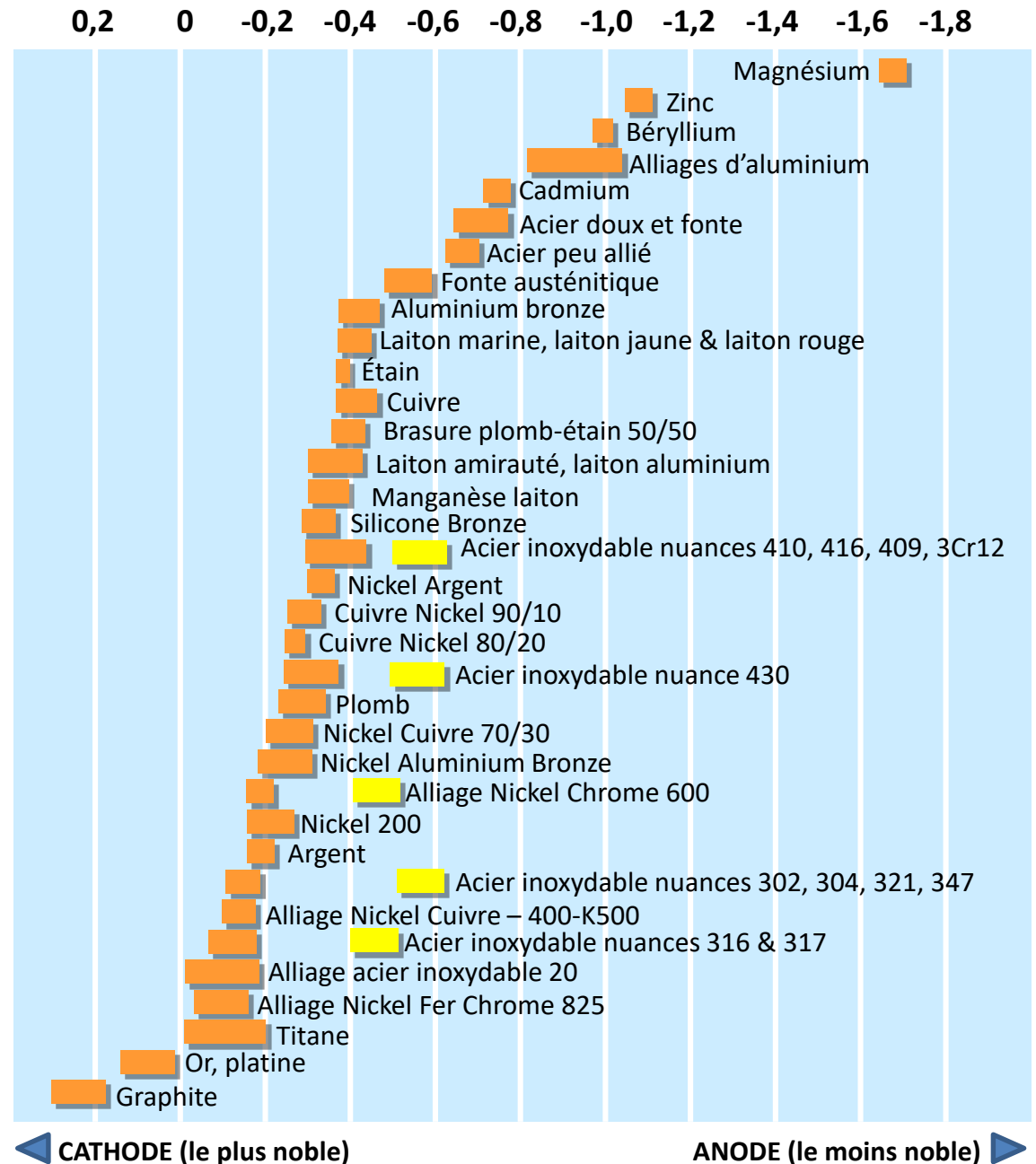
Sur l'exemple de gauche, une platine en acier inoxydable est boulonnée sur un réservoir, également en acier inoxydable, avec des boulons en acier doux. Il en résulte une corrosion galvanique des boulons en présence d'humidité (l'électrolyte)

Mécanisme de corrosion galvanique

- Chaque métal possède un potentiel caractéristique lorsqu'il est immergé dans un électrolyte (mesuré par rapport à une électrode de référence)
- Lorsque 2 métaux sont connectés à l'aide d'un fluide conducteur (de l'humidité suffit) et que les 2 métaux possèdent des potentiels très différents, alors un courant circule du pôle négatif (anode) au pôle positif (cathode)
- Si l'aire de l'anode est petite, on constatera sa dissolution



Échelle galvanique des métaux dans l'eau de mer



Règles de base pour éviter la corrosion galvanique

Revue en
2019

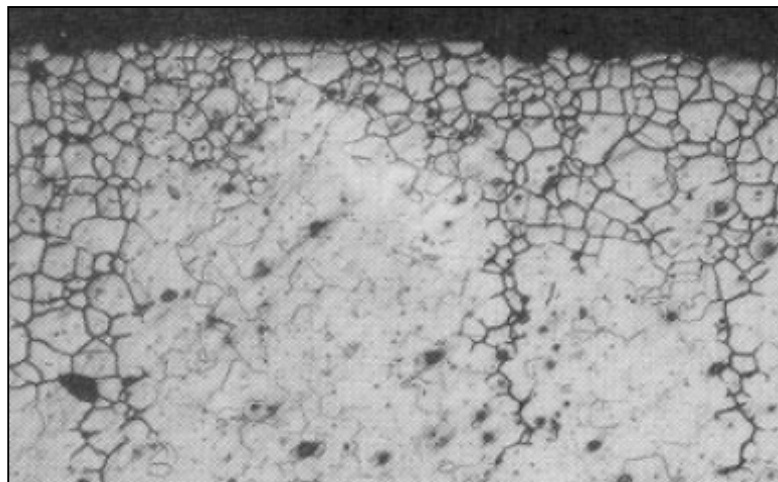
- Éviter des situations où des métaux différents sont en contact
- Lorsque des métaux dissemblables sont en contact, être sûr que le métal le moins noble (anode) possède une plus grande surface que le plus noble (cathode)
- Exemples :
 - Utiliser des fixations en acier inoxydable pour des assemblages sur l'aluminium (et jamais des fixations en aluminium pour assembler de l'acier inoxydable)
 - Même chose entre l'acier inoxydable et l'acier au carbone

Dans le béton(milieu à fort pH)contaminé par des chlorures, l'utilisation de rond à béton inox **n'accroît pas significativement la vitesse de corrosion** des armatures en acier au carbone par couplage galvanique

Pour plus de références voir www.stainlesssteelrebar.org

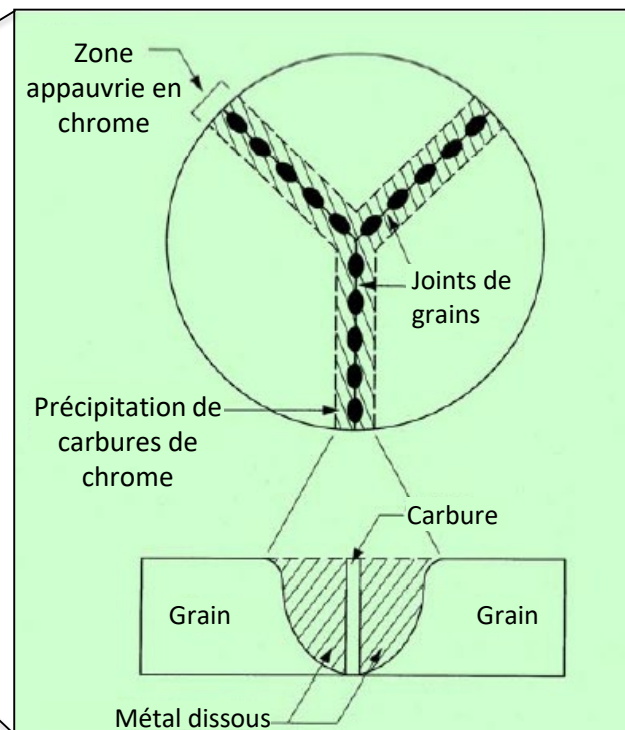
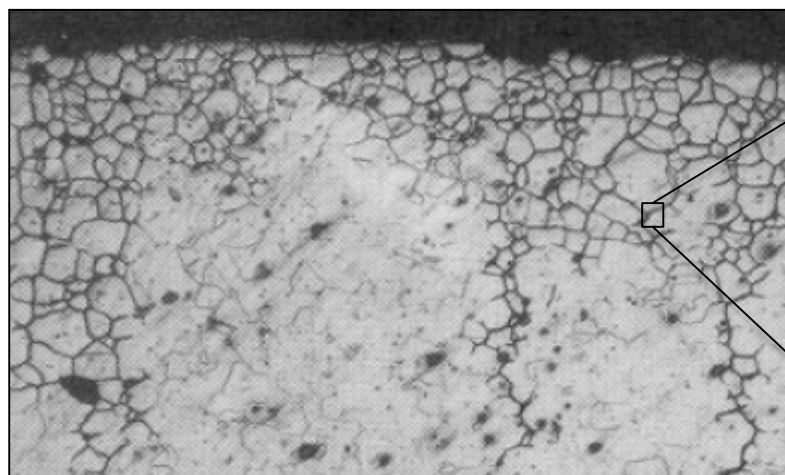
e) Qu'est-ce que la corrosion intergranulaire¹?

Une attaque intergranulaire est provoquée par la formation de carbures de chrome $(Fe,Cr)_{23}C_6$ aux joints de grains, réduisant localement la teneur en chrome et la stabilité de la couche passive.



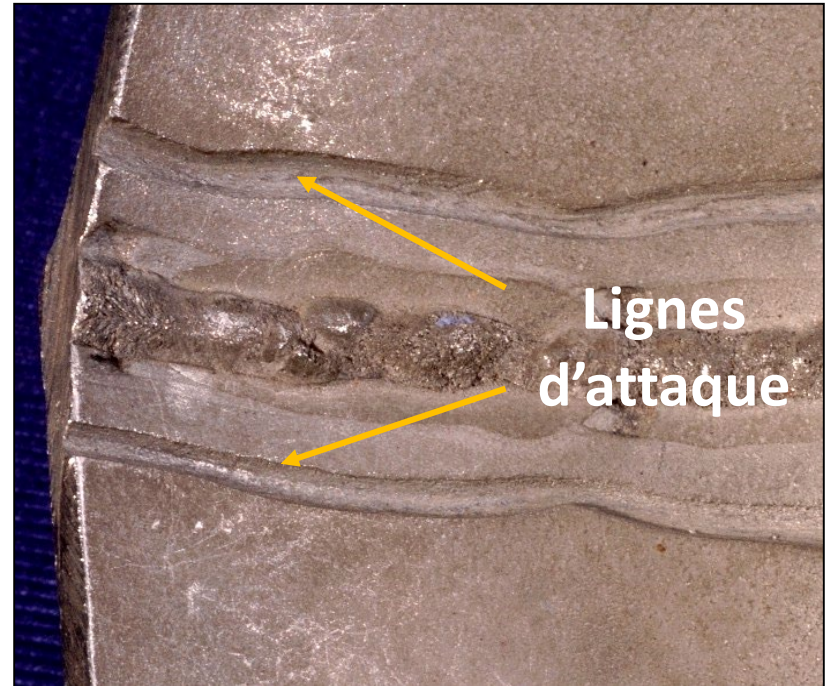
Dans les micrographies ci-dessus, les éprouvettes en acier inoxydable ont été polies puis attaquées par une solution d'acide puissante. Le réseau de lignes noires correspond à une attaque chimique importante aux joints de grains qui montrent une résistance à la corrosion beaucoup plus faible que les grains eux-mêmes.

Vue schématique des zones appauvries en chrome aux joints de grains



Quand la corrosion intergranulaire se produit-elle ?

- Traités correctement, les aciers inoxydables ne sont pas sujets à la corrosion intergranulaire
- Celle-ci peut se produire dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) d'une soudure (de chaque côté du cordon) lorsque :
 - La teneur en carbone est élevée
 - Et que l'acier n'est pas stabilisé (par du Ti, du Nb ou du Zr* qui « piègent » le carbone présent en solution, le rendant indisponible pour la précipitation de carbures aux joints de grains)



Dégradation d'une soudure

* C'est pourquoi il existe des nuances contenant du Ti (*titane*) et/ou du Nb (*niobium*) et/ou du Zr (*zirconium*), nuances qui sont appelées « stabilisées »

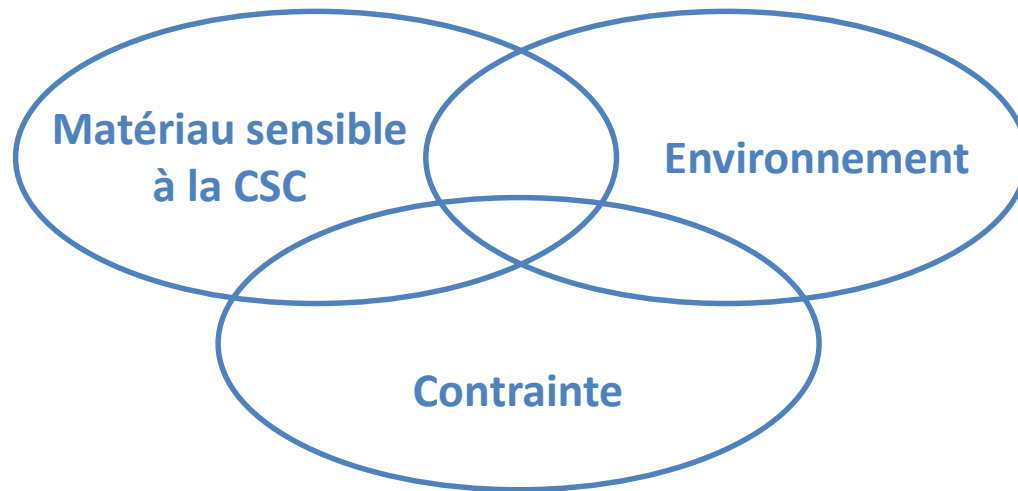
[Pour plus d'informations sur le soudage \(et les autres méthodes d'assemblage\), veuillez vous reporter au Module 9](#)

Comment éviter la corrosion intergranulaire ?

- Utiliser des nuances à bas carbone, en-dessous de 0,03 % pour les inox austénitiques
- Ou utiliser des nuances stabilisées pour les aciers ferritiques et les aciers austénitiques
- Ou pour les inox austénitiques, réaliser un recuit (à 1050°C tous les carbures sont dissous) suivi par une trempe (ce qui est généralement irréalisable dans la pratique).

f) Qu'est-ce que la Corrosion sous Contrainte¹ (CSC)?

- La fissuration rapide et la rupture d'une pièce sans déformation.
- Elle peut survenir lorsque trois conditions sont réunies :
 - La pièce est sollicitée (par une charge appliquée ou des contraintes résiduelles)
 - L'environnement est agressif (fort taux de chlorures, température > 50°C)
 - L'acier inoxydable n'est pas assez résistant à la CSC

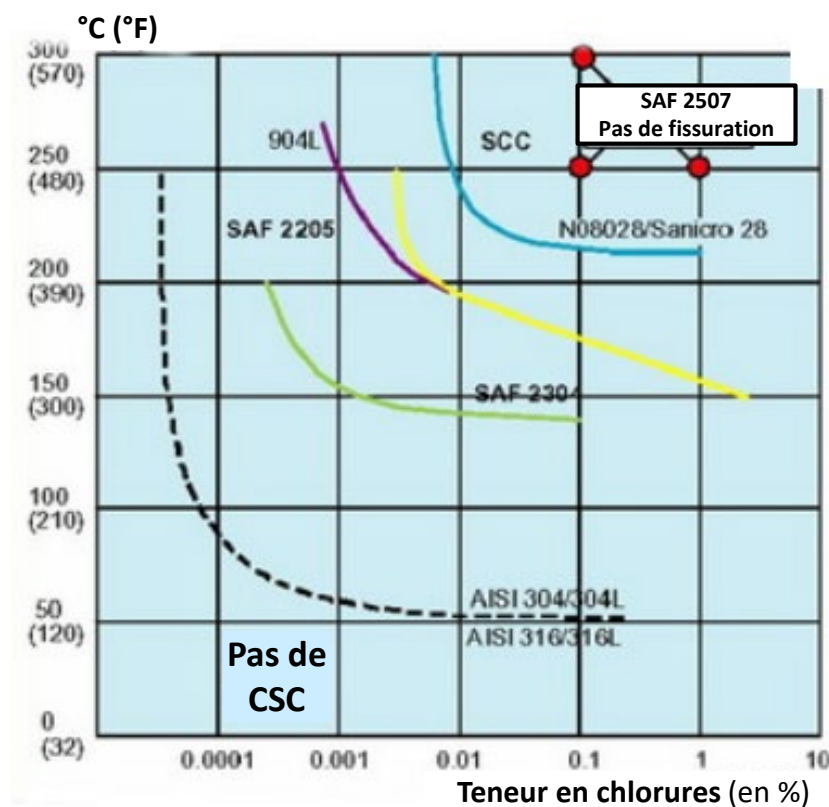


Les aciers inoxydables ferritiques et les duplex (c'est-à-dire austéno-ferritiques) sont insensibles à la CSC

Mécanisme de Corrosion sous Contrainte (CSC)

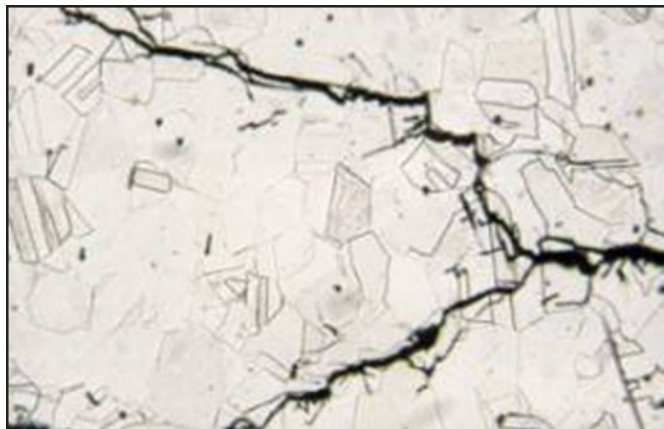
L'action combinée de conditions environnementales (chlorures/température élevée) et de contraintes (soit appliquées directement, soit résiduelles, soit les deux) développe la séquence d'événements suivante :

1. Des piqûres apparaissent
2. Des fissures se créent à partir d'un site d'initiation de piqûre
3. Elle progressent alors à travers le métal selon un mode trans-granulaire ou intergranulaire.
4. La rupture se produit



Note : voir l'Annexe pour les désignations EN normalisées

Pour éviter la CSC – deux choix



Les chlorures induisent la corrosion sous contrainte dans les aciers inoxydables austénitiques standards, à savoir 1.4301/ 304 ou 1.4401 /316

+Ni
+Mo

1.4539
1.4547 (6Mo)

Choisir des aciers inoxydables austénitiques avec une teneur élevée en Ni et Mo (meilleure résistance à la corrosion)

+Cr

1.4462
1.4410
1.4501

Choisir des nuances duplex (elles ont un prix plus stable car elles contiennent moins de nickel)

Les inox ferritiques et austéno-ferritiques (Duplex) sont insensibles à la Corrosion sous Contrainte (car la ferrite n'y est pas sensible, contrairement à l'austénite).
Pour plus d'information sur ces nuances, veuillez vous reporter au Module 4

4. Comment choisir l'acier inoxydable adapté au niveau de résistance à la corrosion recherché ?

Il faut distinguer :

1. Les applications structurales
2. Les autres applications

4-1. Les applications structurales

L'Eurocode 3 Partie 1-4 décrit une procédure permettant de choisir la(les) nuance(s) d'acier inoxydable appropriée(s) à l'environnement des ouvrages (il est à noter qu'au moment de la rédaction de ce document – c'est-à-dire en novembre 2014 – les recommandations du Groupe d'évolution de l'EN 1993-1-4 n'ont pas encore été appliquées)

Cette procédure est présentée dans les prochaines diapos.

Elle est applicable à :

- des éléments soumis à des sollicitations mécaniques
- une utilisation en extérieur
- des environnements sans immersion fréquente dans l'eau de mer
- un pH compris entre 4 et 10
- aucune exposition à des produits chimiques

Comment fonctionne la procédure ?

1. L'environnement est évalué par un coefficient de résistance à la corrosion (**CRF**) qui est la somme de 3 termes :
CRF = F₁ + F₂ + F₃ où :
 - a) F₁ quantifie le risque d'exposition aux chlorures d'eau de mer ou à des sels de déverglaçage
 - b) F₂ quantifie le risque d'exposition au dioxyde de soufre
 - c) F₃ quantifie la fréquence de nettoyage ou de lavage par l'eau de pluie
2. Un tableau de correspondance donne, pour un **CRF** donné, la Classe de la **Résistance à la Corrosion (CRC)** correspondante
3. Les nuances d'acier inoxydable sont positionnées selon la (**CRC**) de I à V en fonction du **CRF**

Les tableaux sont présentés dans les 4 prochaines diapos

F₁ Risque d'exposition aux chlorures (eau salée ou sels de déverglaçage)

Note : M est la distance jusqu'à la mer et S est la distance jusqu'à la route avec des sels de déverglaçage

1	Environnement intérieur contrôlé	
0	Faible risque d'exposition	M > 10 km ou S > 100 m
-3	Risque d'exposition moyen	1 km < M ≤ 10 km ou 10 m < S ≤ 100 m
-7	Risque d'exposition élevé	0,25 km < M ≤ 1 km ou S ≤ 10 m
-10	Risque d'exposition très élevé Tunnels routiers où des sels de déverglaçage sont utilisés ou dans lesquels pourraient circuler des véhicules transportant ce type de sels	
-10	Risque d'exposition très élevé Côtes allemandes de la Mer du Nord Toutes les côtes de la mer Baltique	M ≤ 0,25 km
-15	Risque d'exposition très élevé Côte Atlantique du Portugal , de l'Espagne et de la France Côtes de GB, France, Belgique, Pays-Bas et Sud de la Suède Toutes les autres zones côtières de GB, Norvège, Danemark et Irlande Côtes Méditerranéennes	M ≤ 0,25 km

F₂ Risque d'exposition au dioxyde de soufre

Note : Sur les côtes européennes, les valeurs de dioxyde de soufre sont généralement basses. Loin des côtes, les valeurs de dioxyde de soufre sont soit faibles, soit moyennes. Les classifications élevées sont inhabituelles et associées à des zones très industrielles ou avec des environnements spécifiques comme les tunnels routiers par exemple. Les dépôts de dioxyde de soufre peuvent être évalués selon la méthode de l'ISO 9225.

0	Faible risque d'exposition	(<10 µg/m ³ de dépôts moyens)
-5	Risque d'exposition moyen	(10 – 90 µg/m ³ de dépôts moyens)
-10	Risque d'exposition élevé	(90 – 250 µg/m ³ de dépôts moyens)

F₃ Fréquence de nettoyage ou de lavage par l'eau de pluie

(si F₁ + F₂ = 0, alors F₃ = 0)

0	Entièrement exposé au lavage par l'eau de pluie
-2	Procédure de nettoyage spécifiée
-7	Aucun lavage par la pluie ou aucune procédure de nettoyage

Tableau de correspondance

Tableau A.2 : Détermination de la Classe de Résistance à la Corrosion CRC	
Coefficient de résistance à la corrosion (CRF)	Classe de de résistance à la corrosion (CRC)
CRF = 1	I
$0 \geq \text{CRF} > -7$	II
$-7 \geq \text{CRF} > -15$	III
$-15 \geq \text{CRF} \geq -20$	IV
CRF < -20	V

Classes de résistance à la corrosion des aciers inoxydables

Updated 2019

Tableau A.3 : Nuances dans chaque classe de résistance à la corrosion CRC

Classes de résistance à la corrosion CRC				
I	II	III	IV	V
1.4003	1.4301	1.4401	1.4439	1.4565
1.4016	1.4307	1.4404	1.4539	1.4529
1.4512	1.4311	1.4435	1.4462	1.4547
	1.4541	1.4571		1.4410
	1.4318	1.4429		1.4501
	1.4306	1.4432		1.4507
	1.4567	1.4578		
	1.4482	1.4662		
		1.4362		
		1.4062		
		1.4162		

	Ferritiques		Austénitiques standard		Austénitiques avec Mo
	Lean duplex		Super Austénitiques		Duplex/Super duplex

Notes : Voir l'Annexe pour les désignations EN normalisées
Ceci ne s'applique pas aux piscines

4-2. Les autres applications

- Lorsqu'aucune règle particulière n'est applicable
- Le choix de la nuance doit correspondre à la performance attendue
- Il existe trois moyens d'arriver au résultat :
 - Faire appel à un expert
 - Obtenir de l'aide de la part des associations de développement de l'acier inoxydable
 - Trouver des cas performants pour des environnements similaires (souvent disponibles)

Guide de sélection des nuances pour l'Architecture¹⁰

Il existe néanmoins des guides comme celui présenté ici.

Attention : il n'est **PAS APPLICABLE** si

- L'aspect n'a pas d'importance
- L'intégrité de la structure est la première préoccupation (retourner alors en 4-1.)

Comment fonctionne la procédure ?

- Une note totale est calculée à partir de 5 critères
- Pour chaque note totale correspond une liste de nuances d'inox recommandées

Critères utilisés pour établir la note (voir les prochaines diapos) :

- i. Niveau de pollution
- ii. Exposition marine ou aux sels de déverglaçage
- iii. Conditions météorologiques locales
- iv. Considérations architecturales
- v. Planning d'entretien

i. - Niveau de pollution

Note	
	Rurale
0	Très faible ou inexistant
	Pollution urbaine (industrie légère, échappement automobile)
0	Faible
2	Modérée
3	Élevée*
	Pollution industrielle (gaz agressifs, oxyde de fer, produits chimiques, etc.)
3	Faible ou modérée
4	Élevée*

* Site potentiellement très corrosif. Recourir à un expert en acier inoxydable pour évaluer le site

ii.a - Exposition marine

Note	
	Exposition marine
1	Faible (> 1,6 à 16 km de l'eau de mer)**
3	Modérée (de 30 m à 1,6 km de l'eau de mer)
4	Élevée (< 30 m de l'eau de mer)
5	Marine (quelques embruns ou éclaboussures occasionnelles)*
8	Marine sévère (éclaboussures permanentes)*
10	Marine sévère (immersion continue) *

* Site potentiellement très corrosif. Recourir à un expert en acier inoxydable pour évaluer le site.

** Cette échelle montre que les chlorures peuvent se trouver loin des côtes. Quelques sites de cette catégorie type sont exposés aux chlorures, d'autres non.

ii.b - Exposition aux sels de déverglaçage

Note	
	Exposition aux sels de déverglaçage (distance de la route ou hauteur/sol)
0	Aucune salinité n'a été détectée sur un échantillon prélevé sur le site et aucun changement de condition d'exposition n'est envisagé.
0	Le vent et le trafic sur les routes proches sont trop faibles pour amener des chlorures sur le site et pas d'utilisation de sel de déverglaçage sur les trottoirs
1	Très faible exposition aux sel (de 10 m à 1 km ou 3 à 60 étages)**
2	Faible exposition aux sels (< 10 à 500 m ou 2 à 34 étages)**
3	Exposition modérée aux sels (< 3 à 100 m ou 1 à 22 étages)**
4	Forte exposition aux sels (<2 à 50 m ou 1 à 3 étages)* & **

* Site potentiellement très corrosif. Recourir à un expert en acier inoxydable pour évaluer le site.

** Cette échelle montre qu'on trouve des chlorures assez loin des routes, qu'il s'agisse de petites routes de campagne ou de routes à fort trafic. Tester la concentration en chlorures en surface.

Note : S'il existe à la fois une exposition marine et une exposition aux sels de déverglaçage, consulter un expert.

iii. - Conditions météorologiques locales

Notes	
-1	Climats froids ou tempérés, fortes pluies régulières
-1	Climats chauds ou froids avec humidité habituellement en-dessous de 50 %
0	Climat froid ou tempéré, fortes pluies occasionnelles
0	Climat tropical ou subtropical, humide, très fortes pluies régulières ou saisonnières
1	Climat tempéré, pluies peu fréquentes, humidité supérieure à 50 %
1	Pluies très faibles mais régulières ou brouillard fréquent
2	Chaud, humidité au-dessus de 50 %, pluies très faibles ou absentes***

*** S'il y a aussi exposition aux sels ou à la pollution, recourir à un expert pour évaluer le site.

iv. - Considérations architecturales

Note	
0	Bien exposé pour un lavage facile par la pluie
0	Surfaces verticales avec stries verticales ou non-brossées
-2	État de surface : décapé, électropoli ou rugosité $R_a^* \leq 0,3 \mu\text{m}$
-1	État de surface : rugosité $0,3 \mu\text{m} < R_a^* \leq 0,5 \mu\text{m}$
1	État de surface : rugosité $0,5 \mu\text{m} < R_a^* \leq 1 \mu\text{m}$
2	État de surface : rugosité $R_a^* > 1 \mu\text{m}$
1	Emplacement abrité ou cavernes non scellées***
1	Surfaces horizontales
1	Brossé, stries horizontales

*** S'il y a aussi exposition aux sels ou à la pollution, recourir à un expert pour évaluer le site.

* R_a : Rugosité moyenne (http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/RoughnessMeasurement_EN.pdf)

Ce tableau montre que la résistance à la corrosion dépend aussi de l'état de surface.
Pour une présentation des états de surface existants, veuillez vous reporter au Module 08

v. - Planning d'entretien

Note	
0	Jamais lavé
-1	Lavé au moins naturellement
-2	Lavé quatre fois par an ou plus
-3	Lavé au moins une fois par mois

Choix d'un acier inoxydable à partir de ce système de notation

Note totale (somme des notes précédentes)	Acier inoxydable recommandé
0 à 2	Le type 304/304L est généralement le plus économique
3	Le type 316/316L ou 444 est généralement le plus économique
4	Le type 317L ou un acier inoxydable plus résistant à la corrosion est suggéré
≥ 5	Un acier inoxydable plus résistant à la corrosion comme les 4462, 317LMN, 904L, super duplex, super ferritique ou un acier inoxydable super austénitique avec 6 % de molybdène peut être nécessaire

Note : Voir l'Annexe pour les désignations EN normalisées

Le choix de la nuance d'inox adaptée garantit une excellente durabilité avec un entretien réduit, un bas coût de possession (Life Cycle Cost) et une excellente performance environnementale.

Pour plus d'information sur durabilité et environnement, veuillez vous reporter au Module 11

Conclusion

- Il convient d'être attentif à la sélection de la nuance d'acier inoxydable correcte en fonction du type d'application et de l'environnement.
- Lorsqu'il est correctement choisi, l'acier inoxydable offrira une durée d'utilisation illimitée et sans entretien.

Le [Module 2](#) présente une large palette d'applications des inox tandis que le [Module 1](#) vous fera découvrir des réalisations artistiques intemporelles qui, nous espérons, pourront être sources d'inspiration

5. Références

1. Excellent cours sur la corrosion. Please, have a look at chapters 7 (Galvanic Corrosion), 8 (intergranular corrosion), 11 (crevice corrosion) 12 (pitting) 14 (Stress corrosion cracking) and 15 (stress corrosion cracking of stainless steels) <http://corrosion.kaist.ac.kr/download/2008-1/chap11.pdf>
2. Some basics on corrosion from NACE <http://corrosion-doctors.org/Corrosion-History/Course.htm#Scope>
3. An online course on corrosion http://www.corrosionclinic.com/corrosion_online_lectures/ME303L10.HTM#top
4. Information on electrochemical testing <http://mee-inc.com/esca.html>
5. Ugitech : private communication
6. BSSA (British Stainless Steel Association) website " Calculation of pitting resistance equivalent numbers (PREN)" <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=111>
7. On Pitting corrosion https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/45442/FrankelG_JournalElectrochemicalSociety_1998_v145n6_p2186-2198.pdf?sequence=1
8. http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_3rd_Edition.pdf
9. <http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/steel-grades.php>
10. a) J. McGray and G Gedge: EN1993-1-4 Annex 4 and service experience of real structures Paper presented at the Duplex Deminar and Summit 2016 b) http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/IMOA_Houska-Selecting_Stainless_Steel_for_Optimum_Performance.pdf
11. http://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic_corrosion
12. <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=668>
13. http://www.stainless-steel-world.net/pdf/SSW_0812_duplex.pdf
14. <http://www.outokumpu.com/en/stainless-steel/grades/duplex/Pages/default.aspx>
15. http://www.aperam.com/uploads/stainlesseurope/TechnicalPublications/Duplex_Maastricht_EN-22p-7064Ko.pdf
16. <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=606>
17. a) Chemical composition of stainless steel flat products for general purposes to EN 10088-2: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=44> b) Chemical composition of stainless steel long products for general purposes to EN 10088-3: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=46>

Annexe : Désignations¹⁷

Désignation EN		Désignations alternatives			
Nom de l'acier	Référence	AISI	UNS	Autres US	Générique/ Marque
Aciers inoxydables ferritiques - nuances standard					
X2CrNi12	1.4003		S40977		3CR12
X2CrTi12	1.4512	409	S40900		
X6CrNiTi12	1.4516				
X6Cr13	1.4000	410S	S41008		
X6CrAl13	1.4002	405	S40500		
X6Cr17	1.4016	430	S43000		
X3CrTi17	1.4510	439	S43035		
X3CrNb17	1.4511	430Nb			
X6CrMo17-1	1.4113	434	S43400		
X2CrMoTi18-2	1.4521	444	S44400		
Aciers inoxydables martensitiques - nuances standard					
X12Cr13	1.4006	410	S41000		
X20Cr13	1.4021	420	S42000		
X30Cr13	1.4028	420	S42000		
X3CrNiMo13-4	1.4313		S41500	F6NM	
X4CrNiMo16-5-1	1.4418				248 SV
Acier inoxydable martensitique à durcissement par précipitation - nuance spéciale					
X5CrNiCuNb16-4	1.4542		S17400		17-4 PH

Désignation EN		Désignations alternatives			
Nom de l'acier	Référence	AISI	UNS	Autres US	Générique/ Marque
Aciers inoxydables austénitiques - nuances standard					
X10CrNi18-8	1.4310	301	S30100		
X2CrNi18-9	1.4307	304L	S30403		
X2CrNi19-11	1.4306	304L	S30403		
X2CrNi18-10	1.4311	304LN	S30453		
X5CrNi18-10	1.4301	304	S30400		
X6CrNiTi18-10	1.4541	321	S32100		
X4CrNi18-12	1.4303	305	S30500		
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L	S31603		
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	316LN	S31653		
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	316	S31600		
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	316Ti	S31635		
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	316L	S31603		
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	316L	S31603		
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	317LMN			
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539		N08904		904L
Aciers inoxydables austéno-ferritiques - nuances standard					
X2CrNiN22-2	1.4062		S32202		DX 2202
X2CrMnNiMoN21-5-3	1.4482		S32001		
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162		S32101		2101 LDX
X2CrNiN23-4	1.4362		S32304		2304
X2CrNiMoN12-5-3	1.4462		S31803/ S32205	F51	2205

Note : Ceci est un tableau simplifié. Pour des nuances spéciales, voir la référence 17.

Merci !

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 démoli
 - 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 !

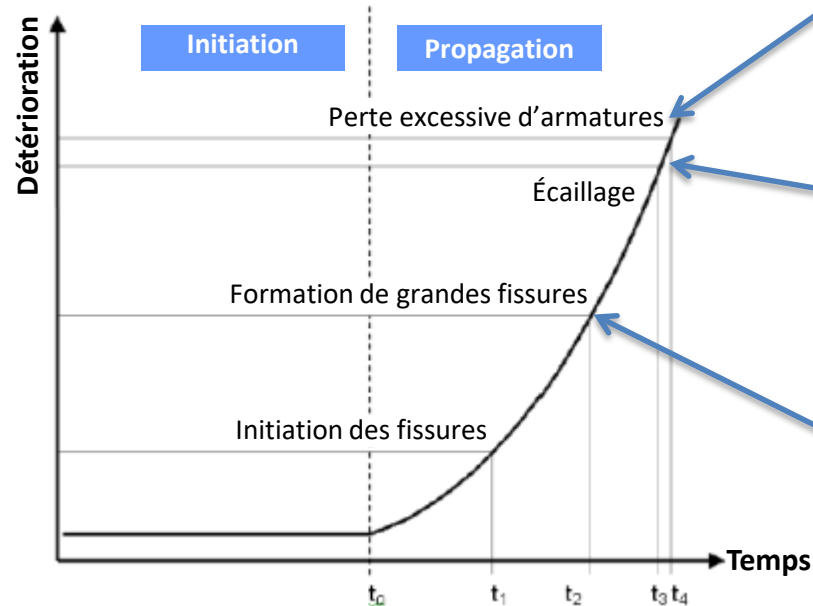


Comment le béton armé est endommagé par la corrosion

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.

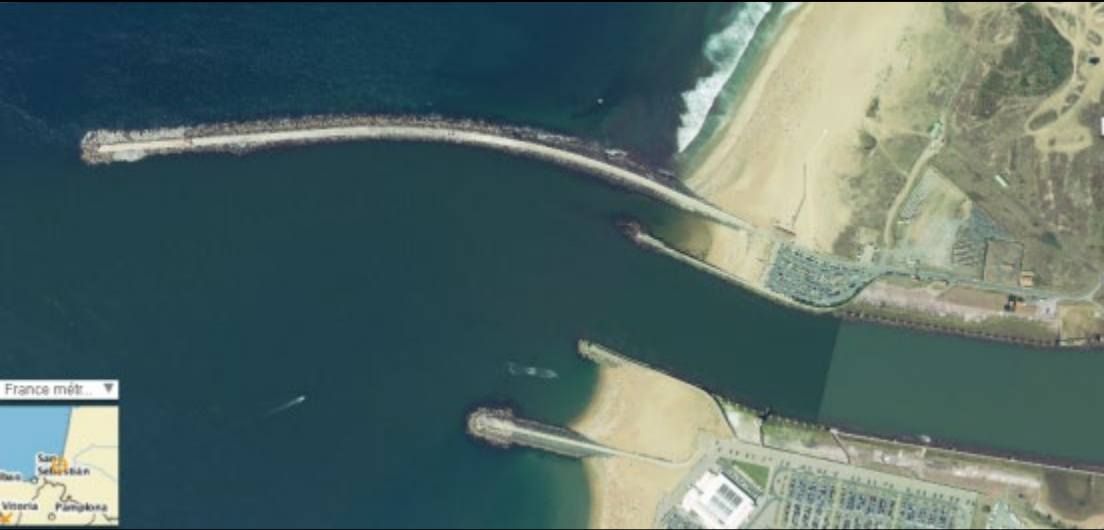
Même si le coût de l'acier inoxydable est beaucoup plus important que celui de l'acier traditionnel, le coût du cycle de vie du pont sera considérablement réduit.





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

Réparation de la digue de Bayonne, France

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

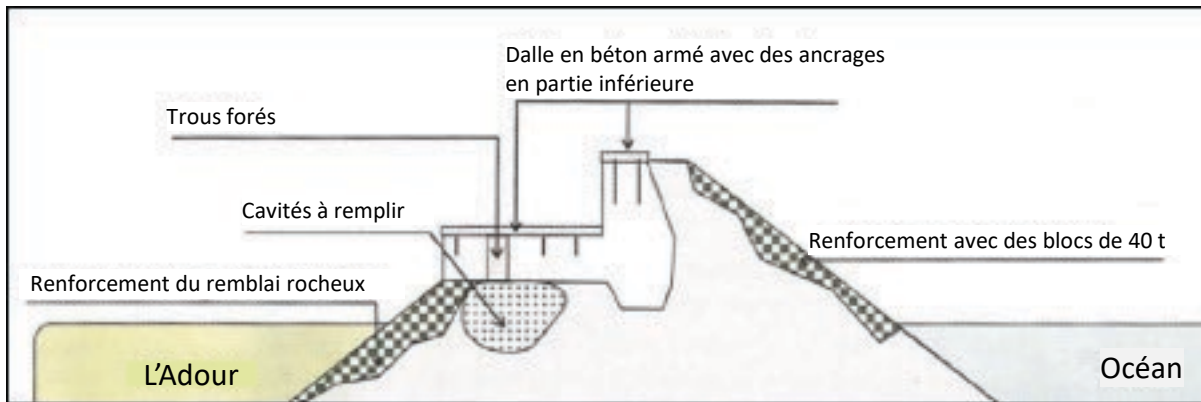
Le côté océan est plus haut et il est protégé par des blocs de 40 t qui doivent être remplacés au fur et à mesure de leur usure par les tempêtes.

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

Fissures à réparer sur le quai et le mur



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

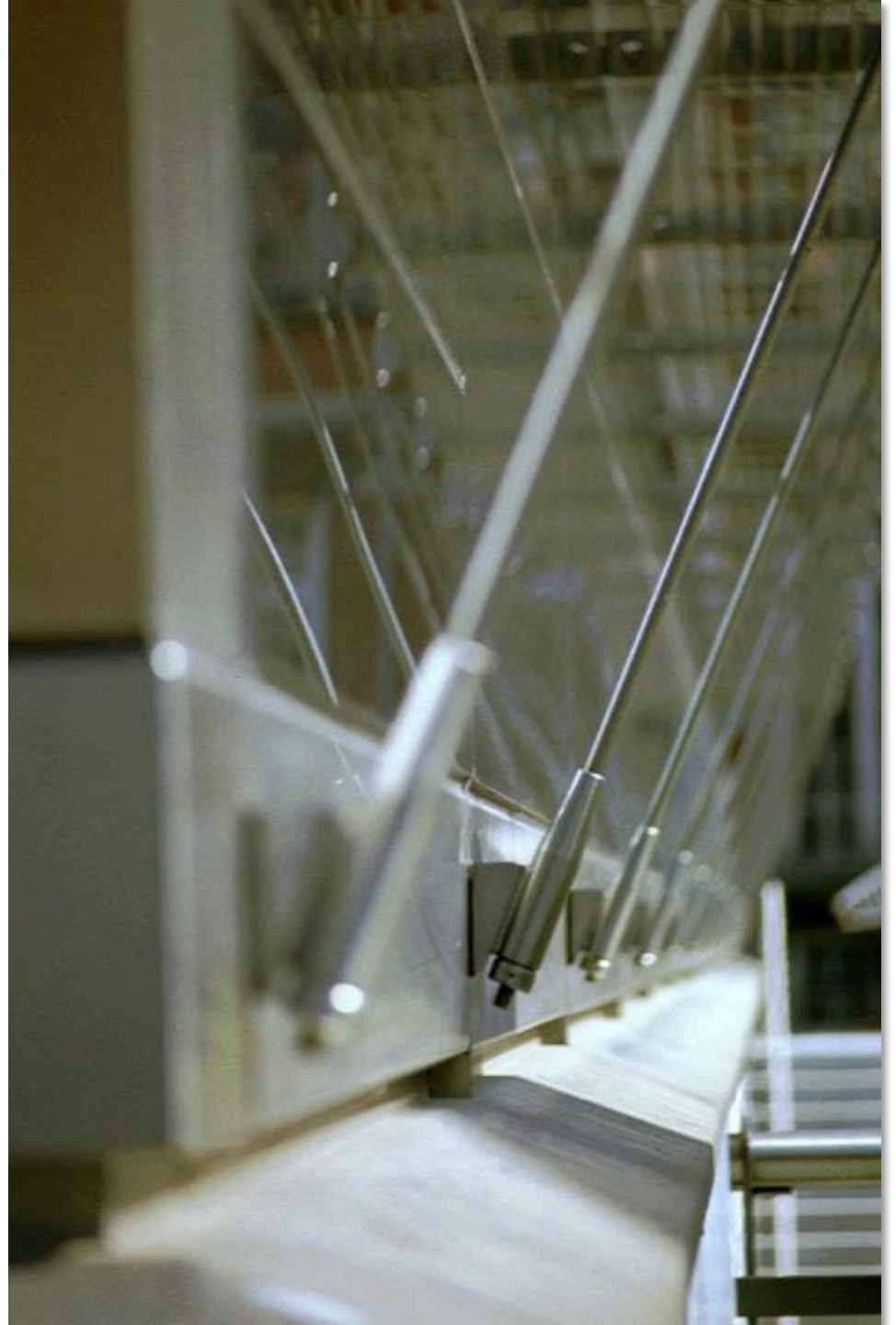
Bureau d'études : THV Van Laere-Braekel Aero

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

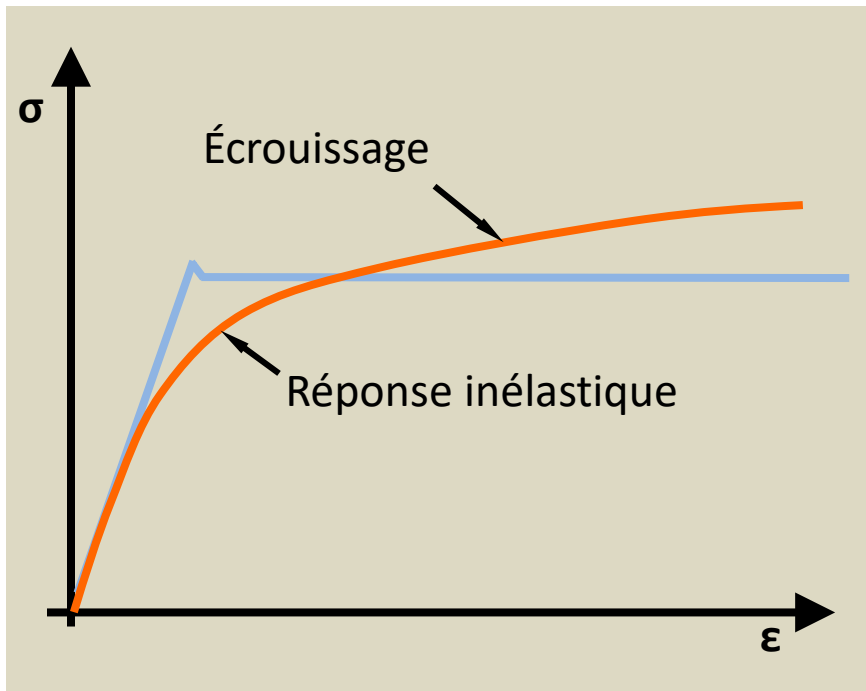


Partie 2

Caractéristiques mécaniques des matériaux

Caractéristiques contrainte-déformation : aciers au carbone / aciers inoxydables

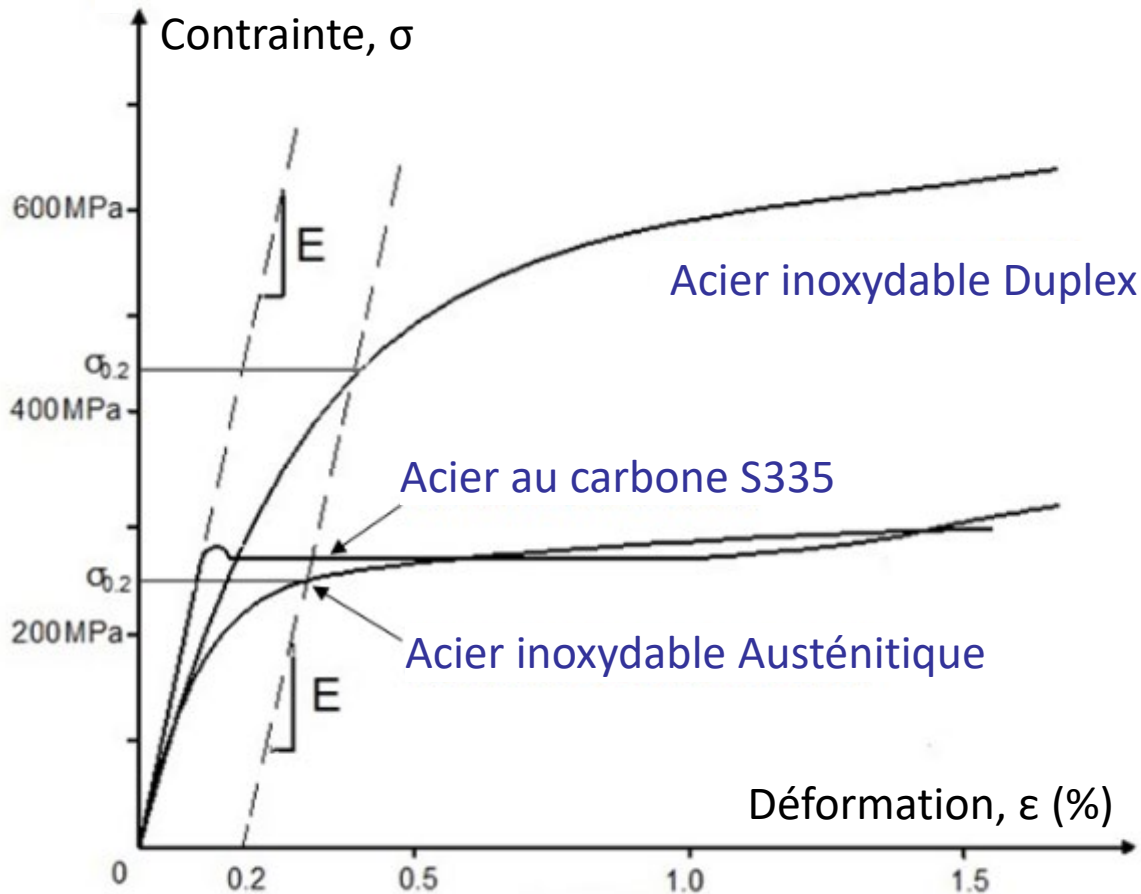
La loi de comportement σ - ϵ des aciers inoxydables est fondamentalement différente de celle des aciers au carbone



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

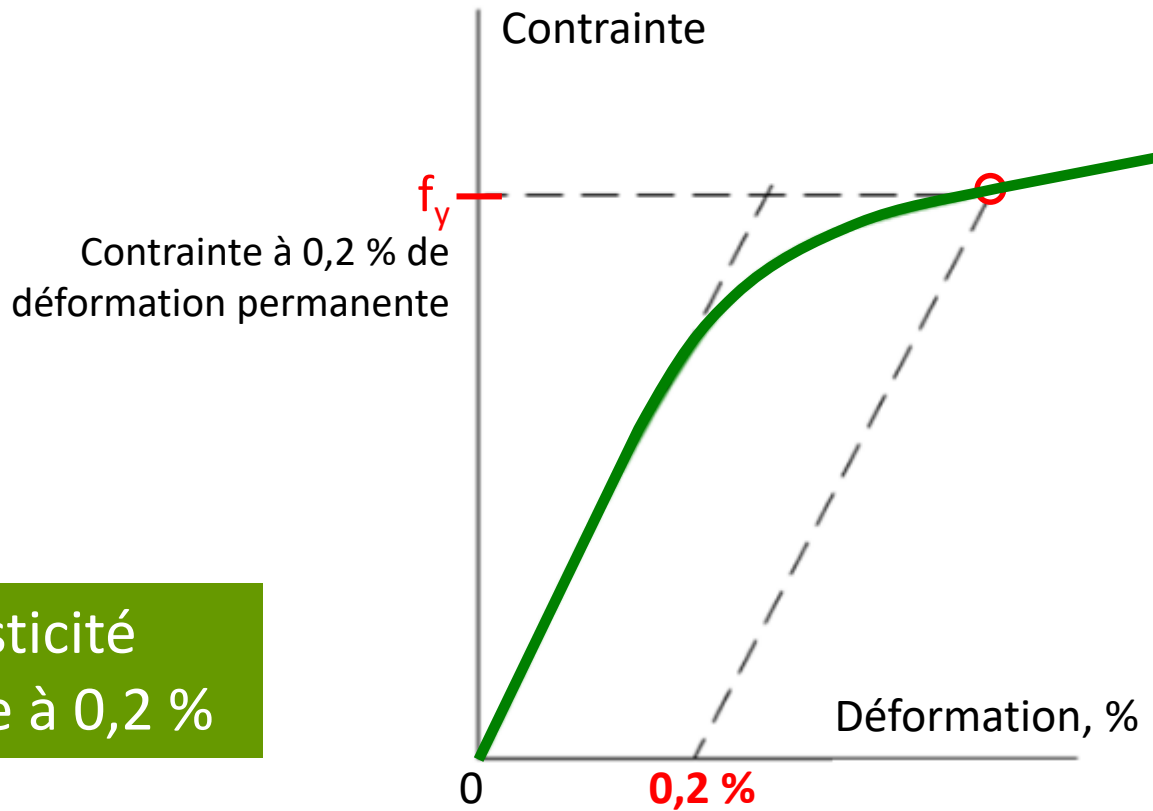
L'acier inoxydable présente un comportement plastique progressif avec un fort écrouissage.

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 %

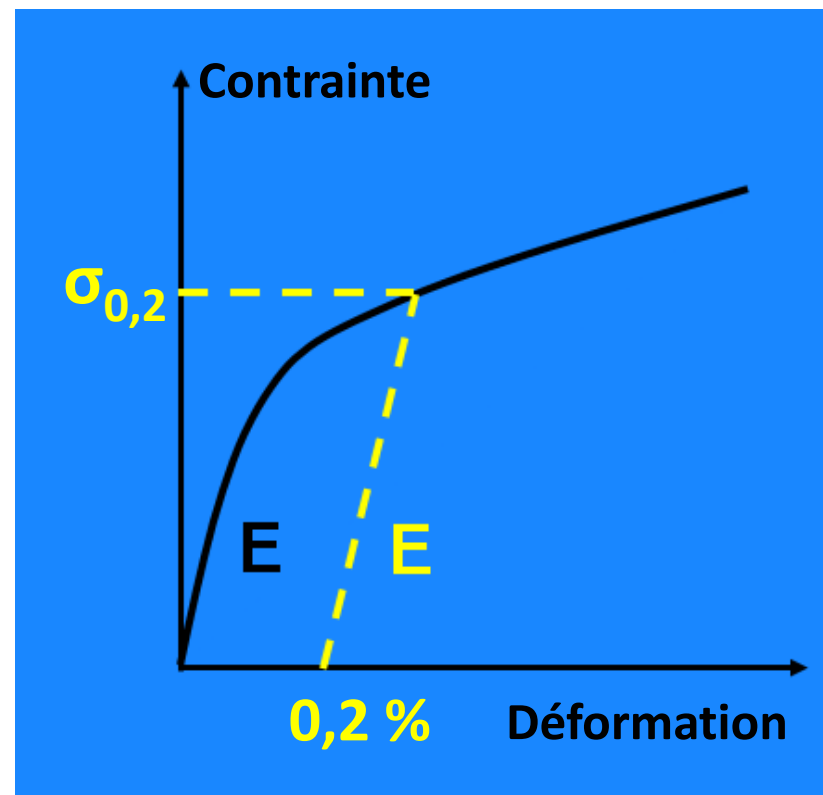
Résistance de calcul de l'acier inoxydable

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

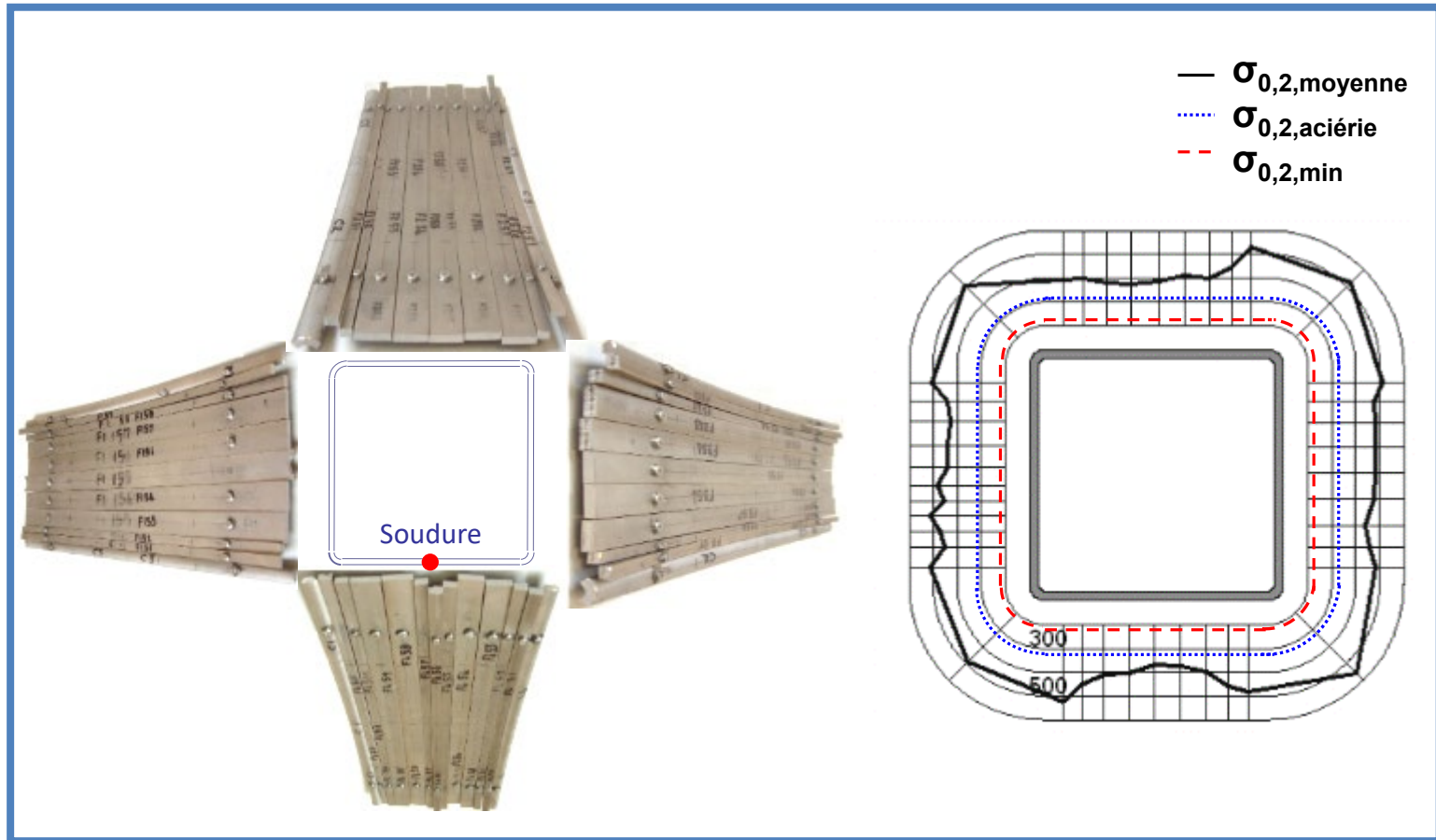
Écrouissage (lors de la production de l'acier ou du laminage à froid)

- 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

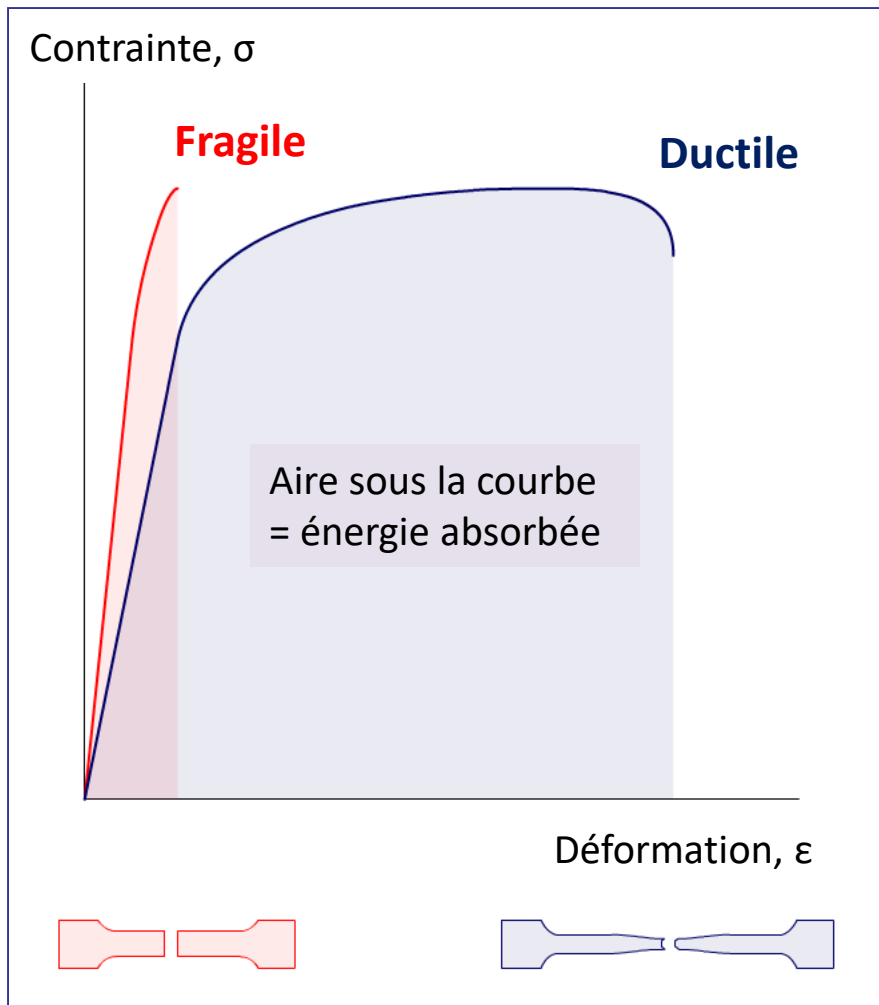




L'écrouissage – il n'est pas toujours utile

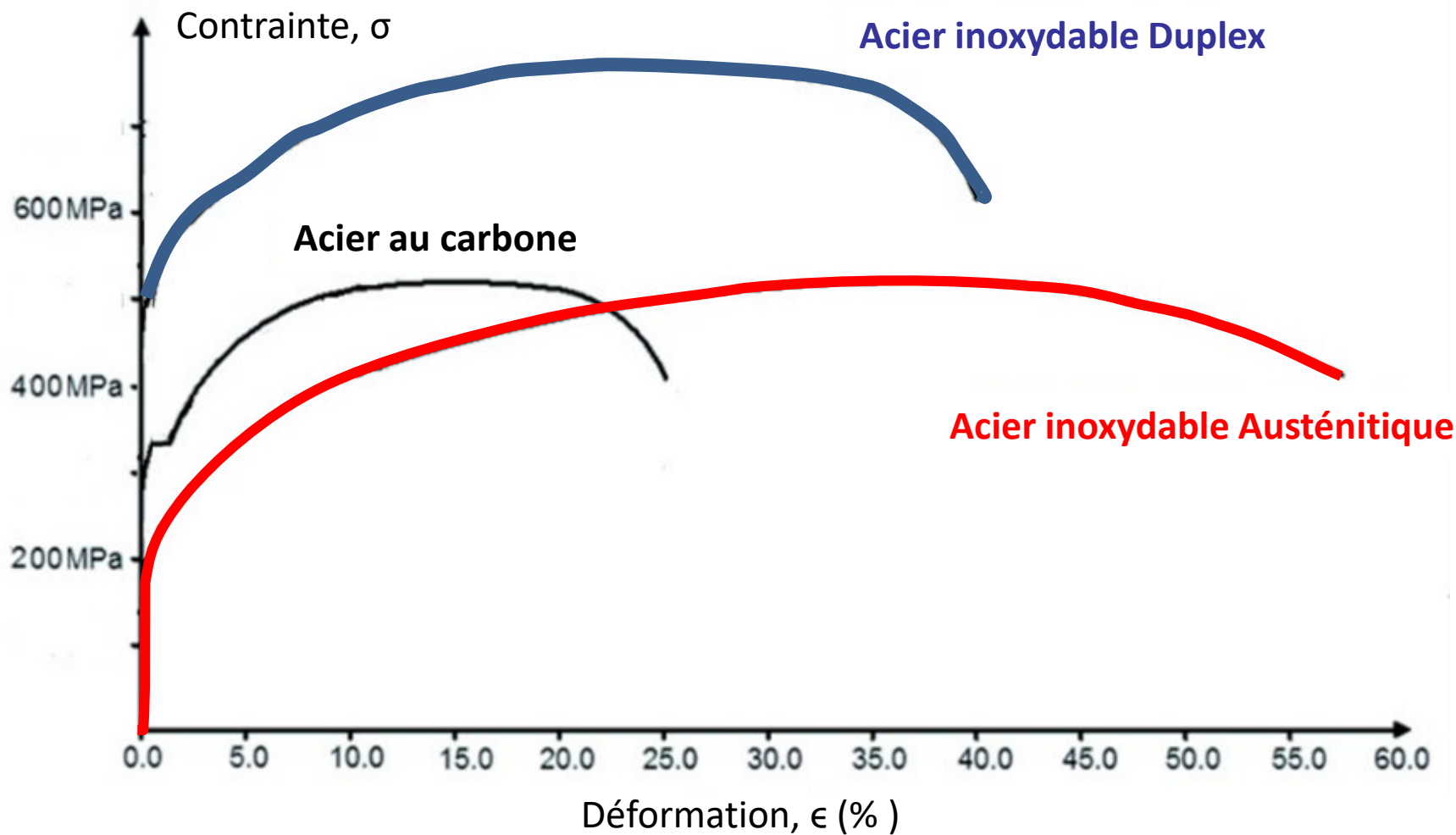
- Il exige des équipements de fabrication plus lourds et plus puissants
- Il nécessite des efforts plus importants
- Il réduit la ductilité (mais celle-ci est initialement élevée, particulièrement pour les austénitiques)
- Il peut entraîner des contraintes résiduelles indésirables

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

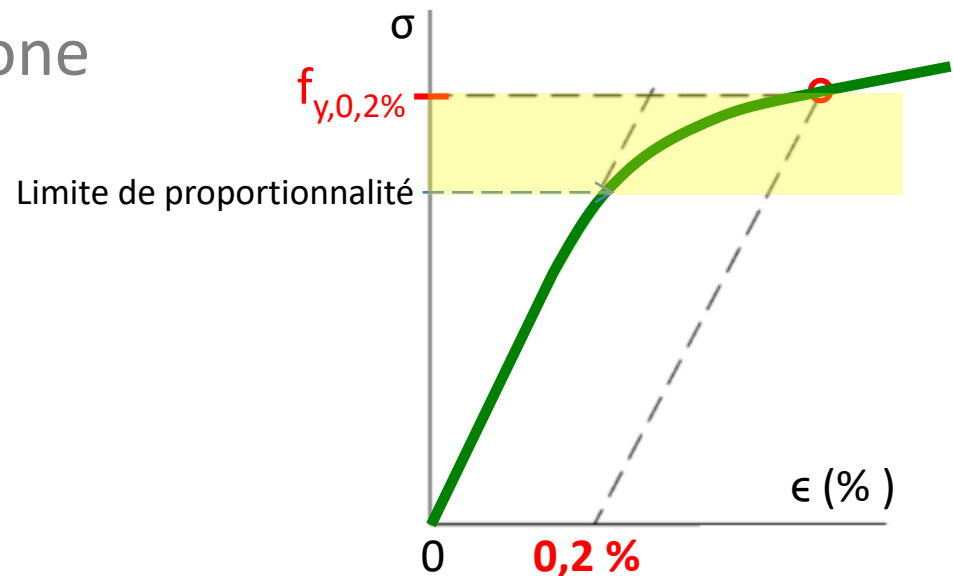
- Pour les **faibles élancements** :
Les poteaux atteignent/dépassent la charge d'écrasement
→ les **bénéfices** de l'écrouissage sont très nets.
Les aciers inoxydables se comportent au moins aussi bien que les aciers au carbone
- Pour les **grands élancements** :
La résistance sous charges axiales reste 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

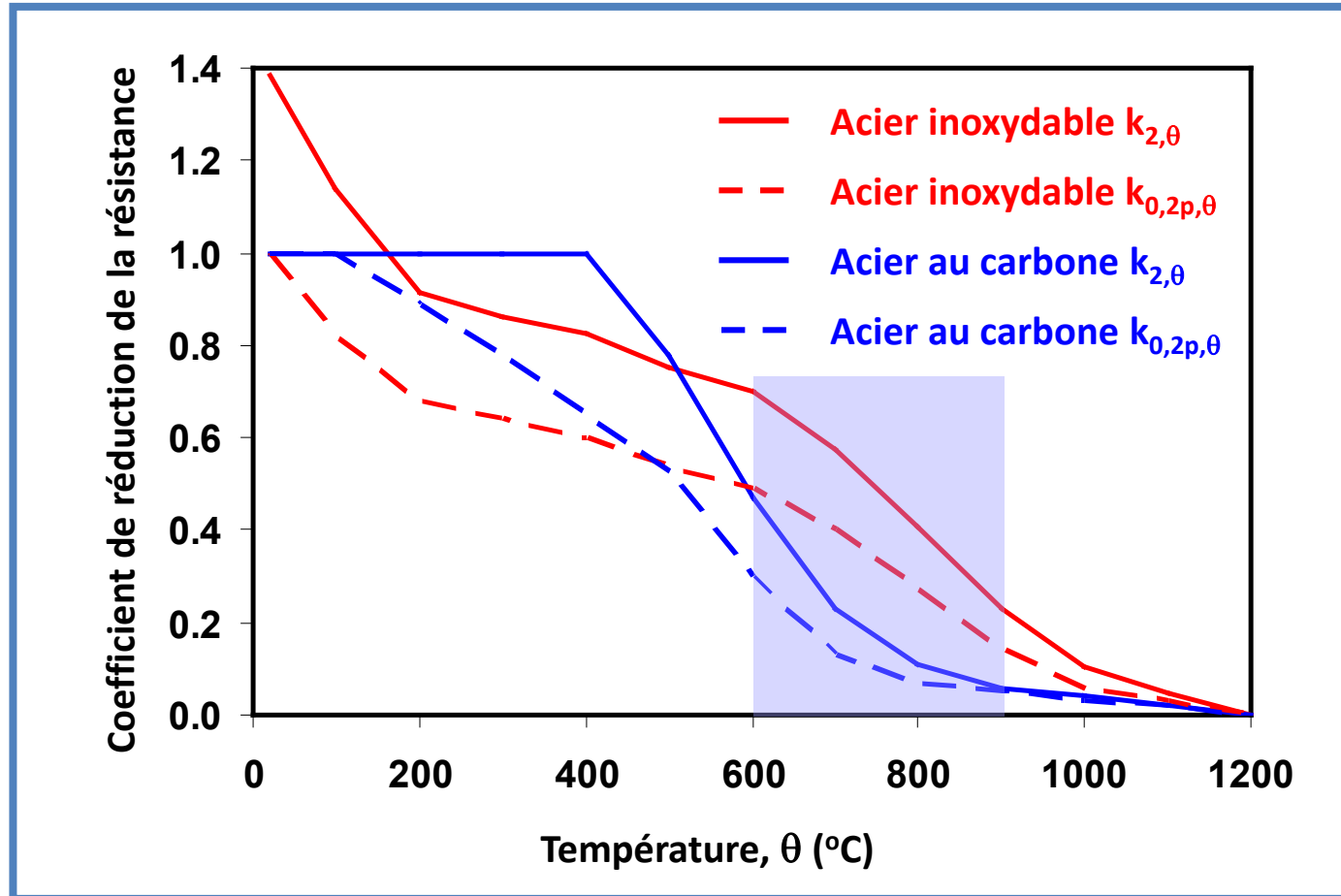
- Pour les **élancements intermédiaires** :

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



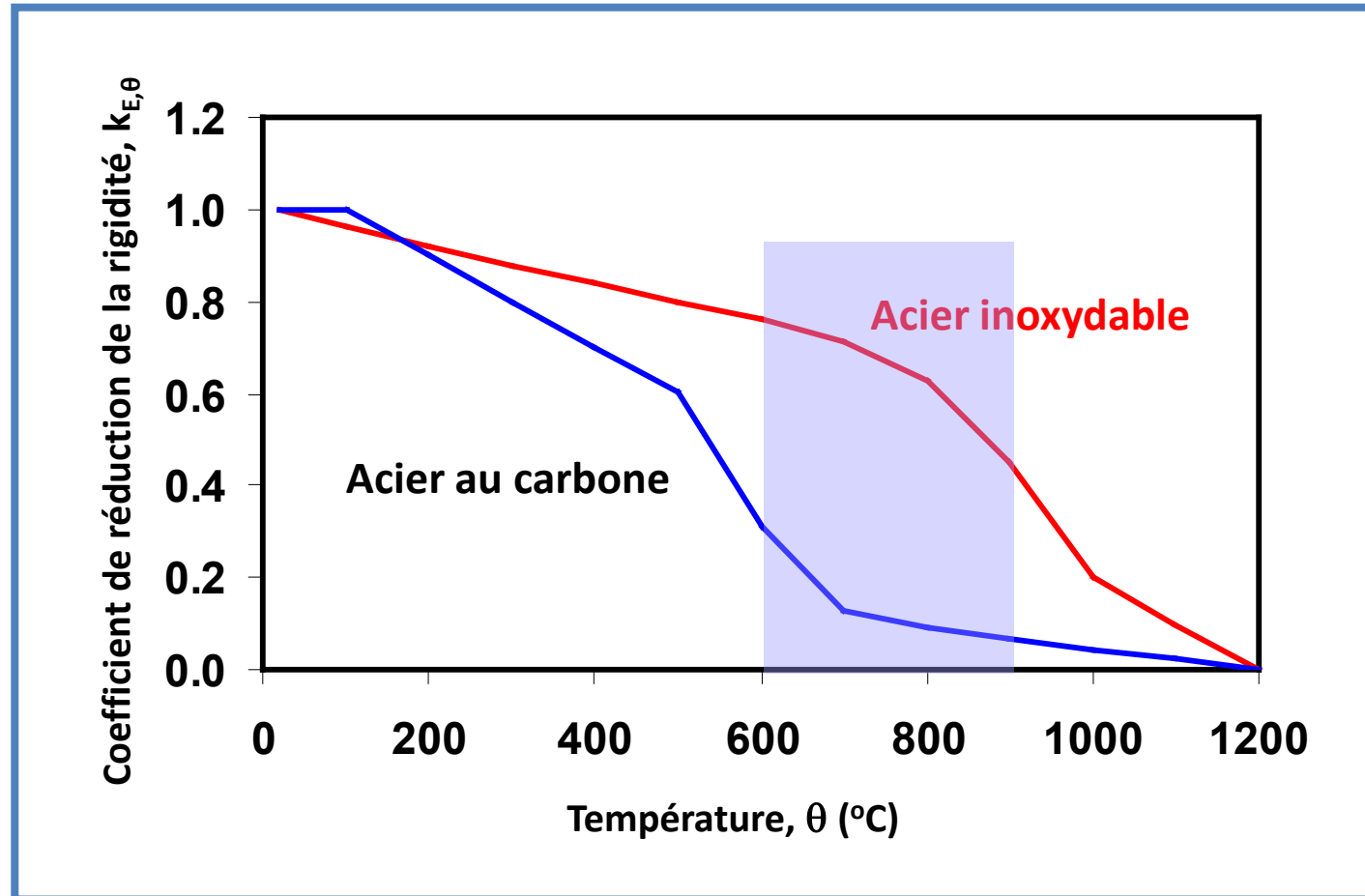
Comportement aux températures élevées



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

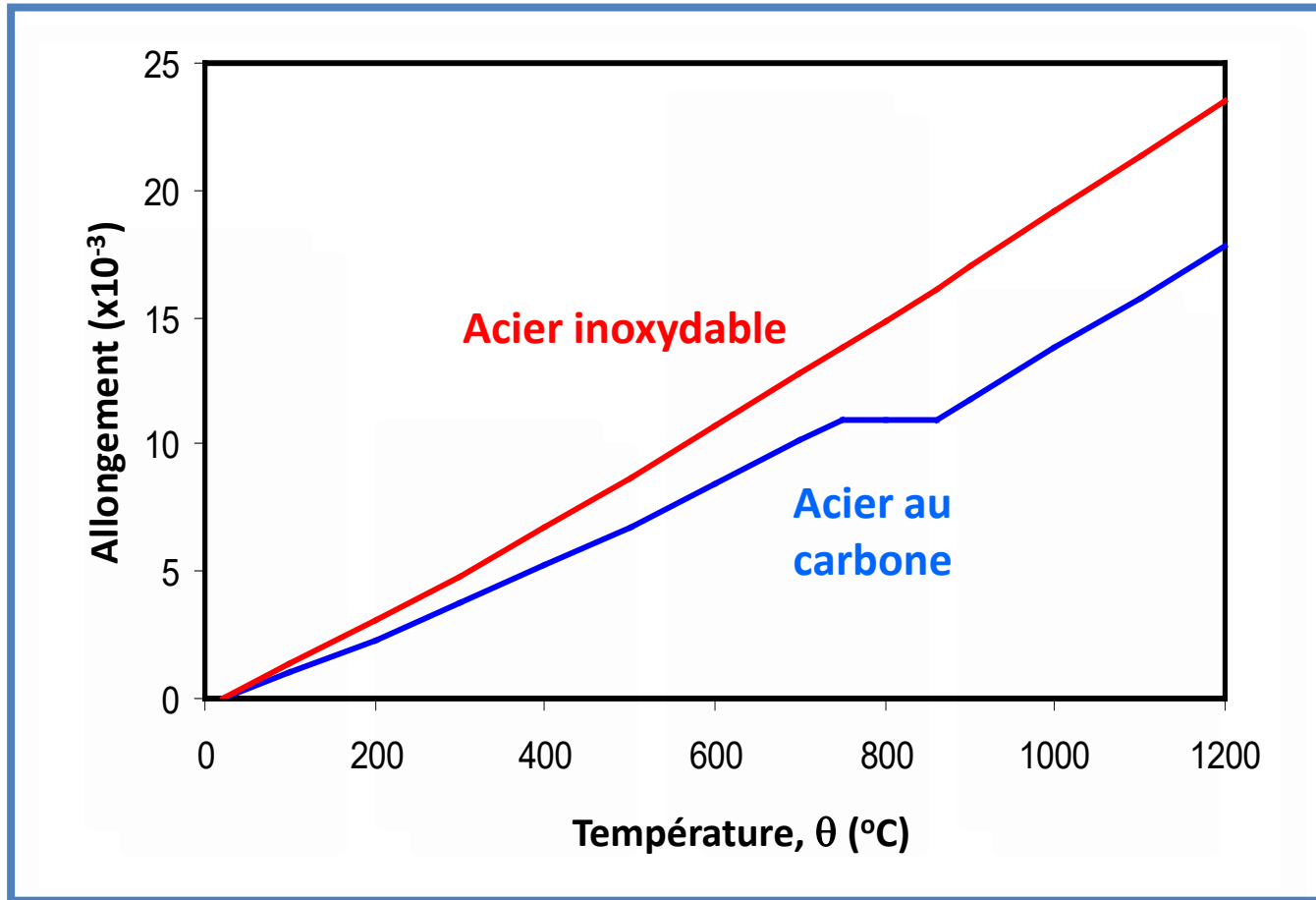
$k_{2,\theta}$ = coefficient de réduction pour une déformation totale de 2 %

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

Éditée et diffusée 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

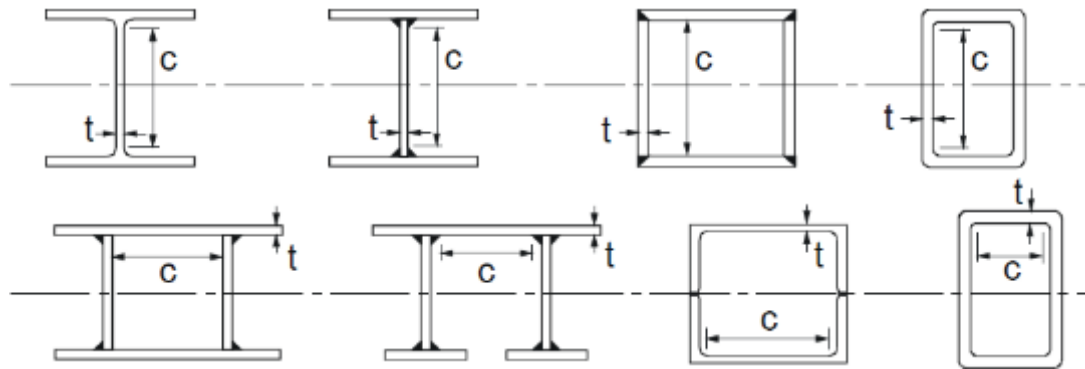
- Limites des rapports largeur-épaisseur plus basses que pour l'acier au carbone
- Expressions légèrement différentes pour le calcul des largeurs efficaces des parois comprimées

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

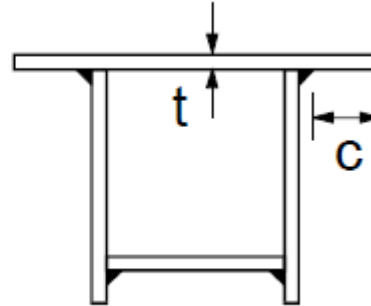
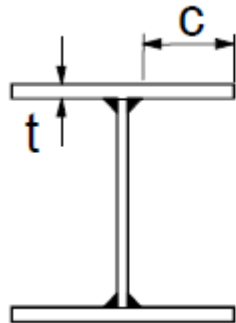
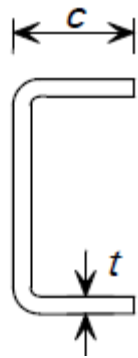


$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000}}$$

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



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

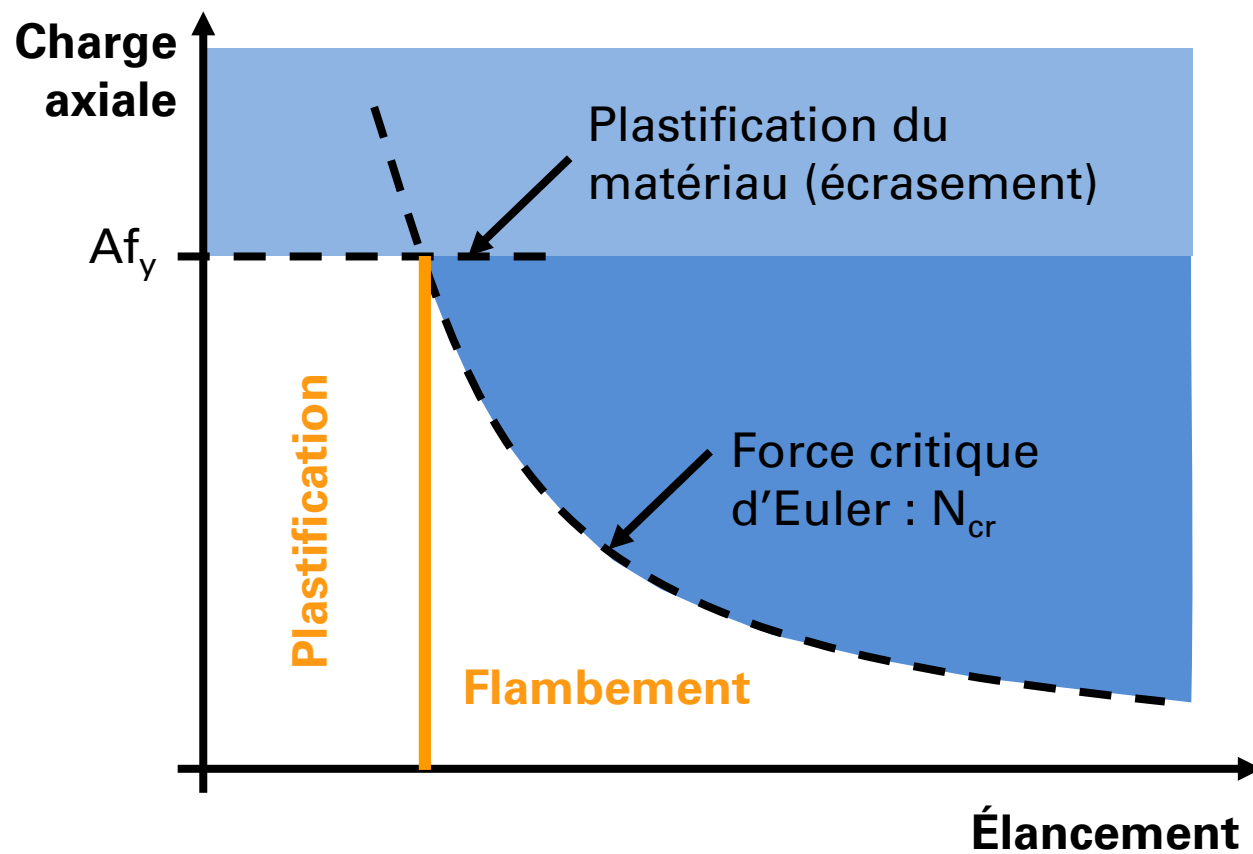
	EC3-1-1 : Acier au carbone	EC3-1-4 : Acier inoxydable		EC3-1-4 : Future version
Classe	Compression	Compression Soudé	Compression Formé à froid	Compression
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9,4\varepsilon$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

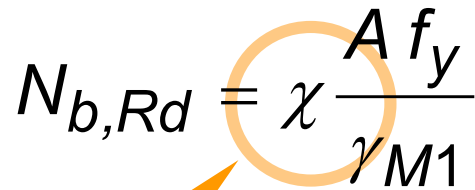
Flambement d'un poteau « parfait »

2 limites : plastification et flambement :



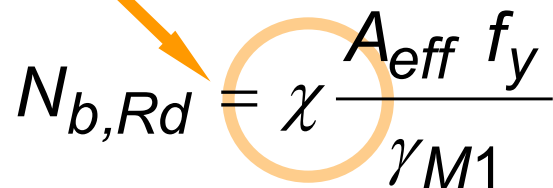
Flambement d'un poteau

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

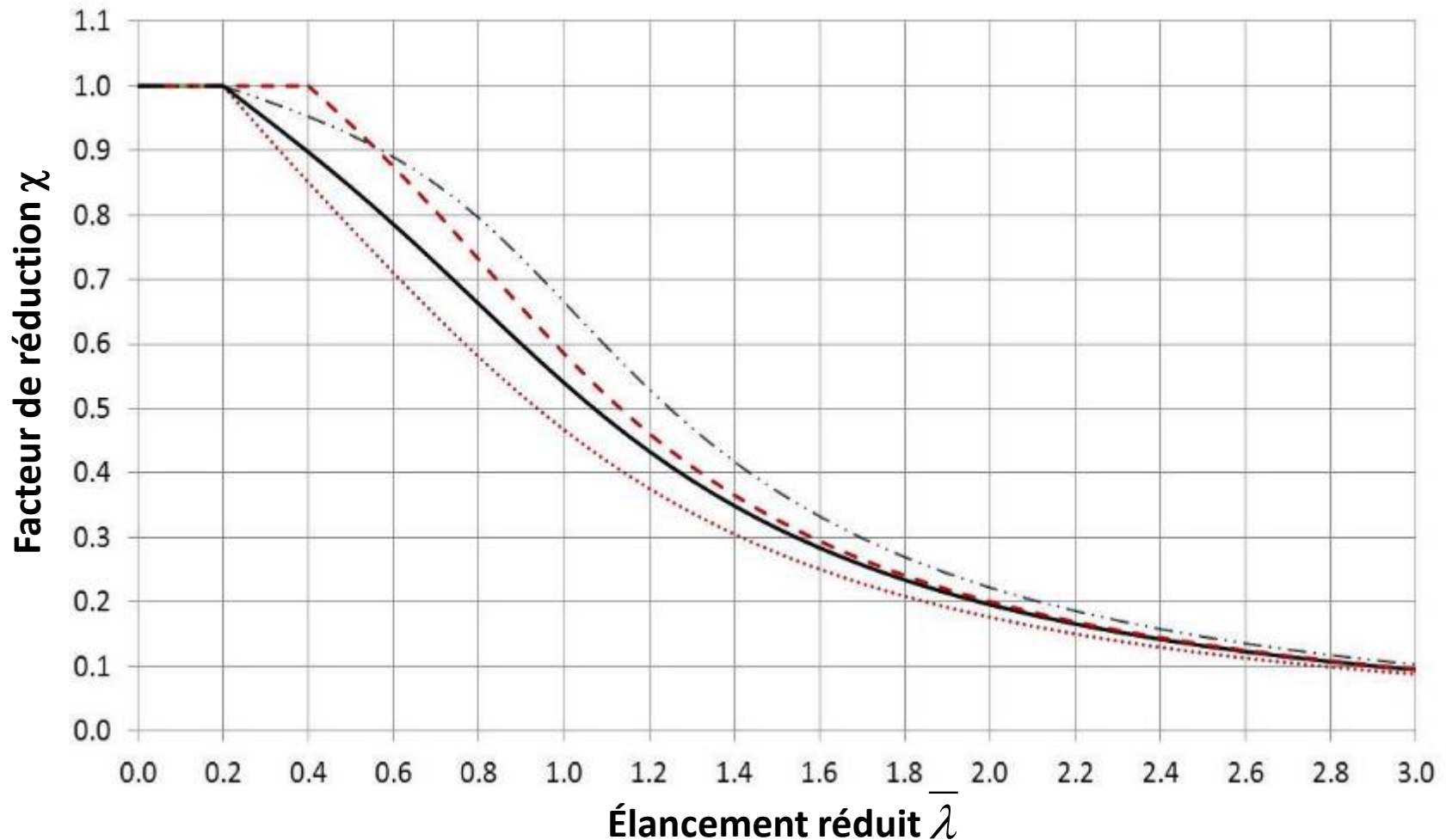
- Le choix de la courbe de flambement dépend de la section transversale, du mode de fabrication et de l'axe de flambement

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

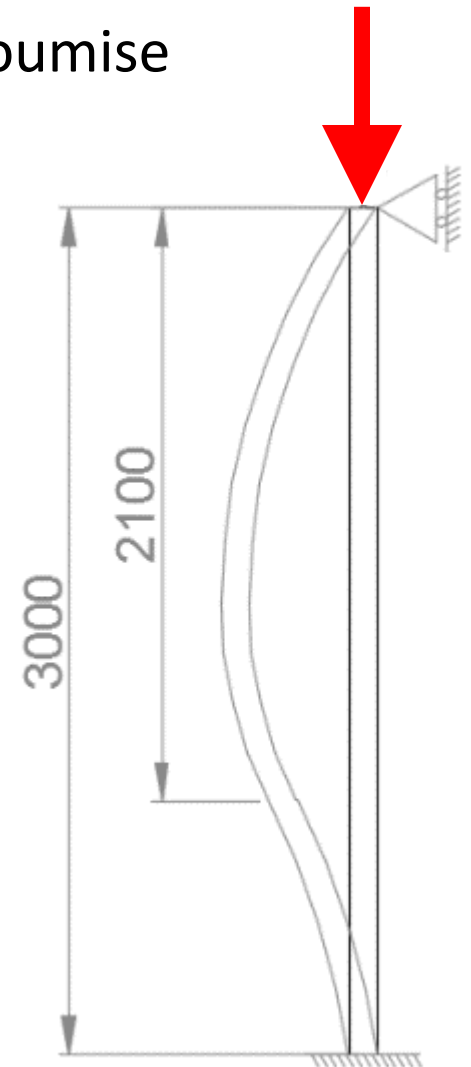
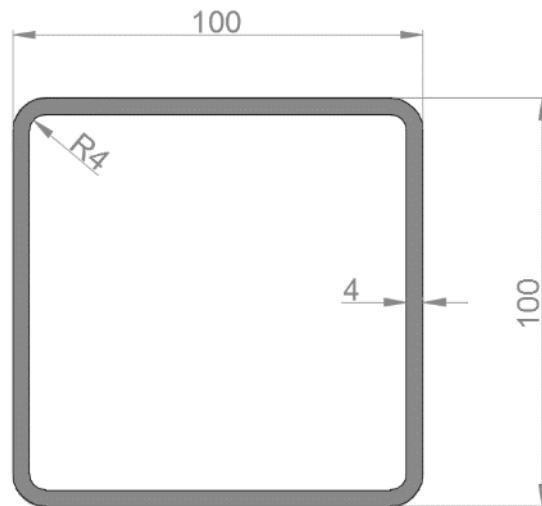


- Acier inoxydable : sections creuses (soudées et non soudées), U formés à froid
- Acier inoxydable : sections en I soudées
- Acier au carbone : sections en I soudées, sections creuses formées à froid, U formés à froid
- · - Acier au carbone : sections creuses finies à chaud

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

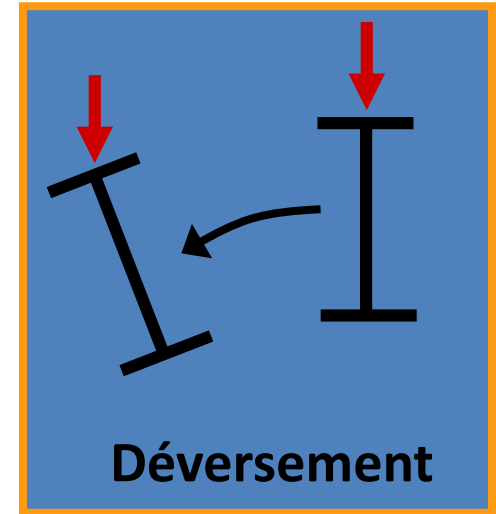
■ Comparaison

	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

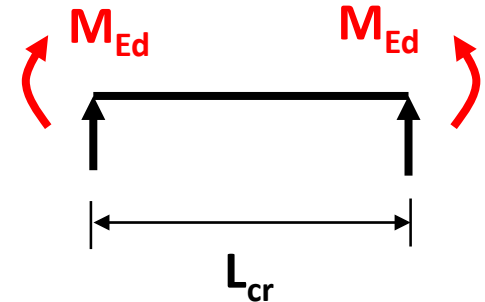
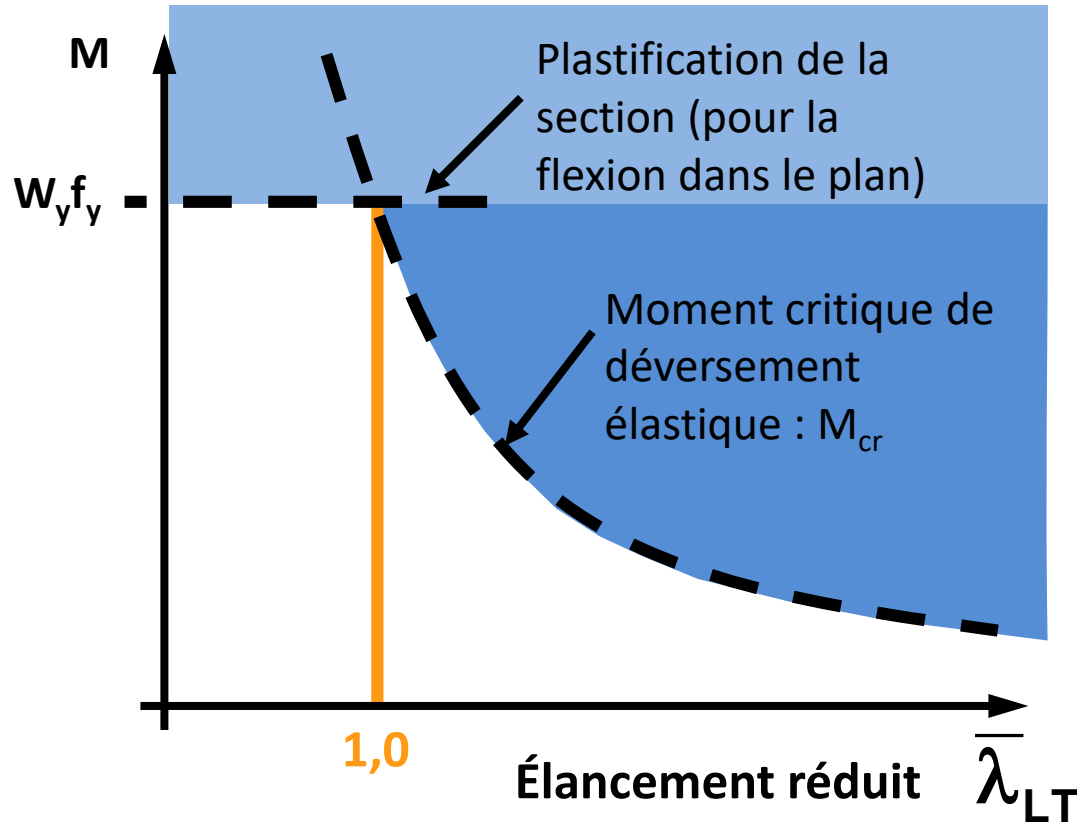
Déversement

- 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 : $\bar{\lambda}_{LT} < 0,4$



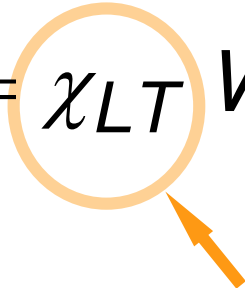
Déversement

- 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 :

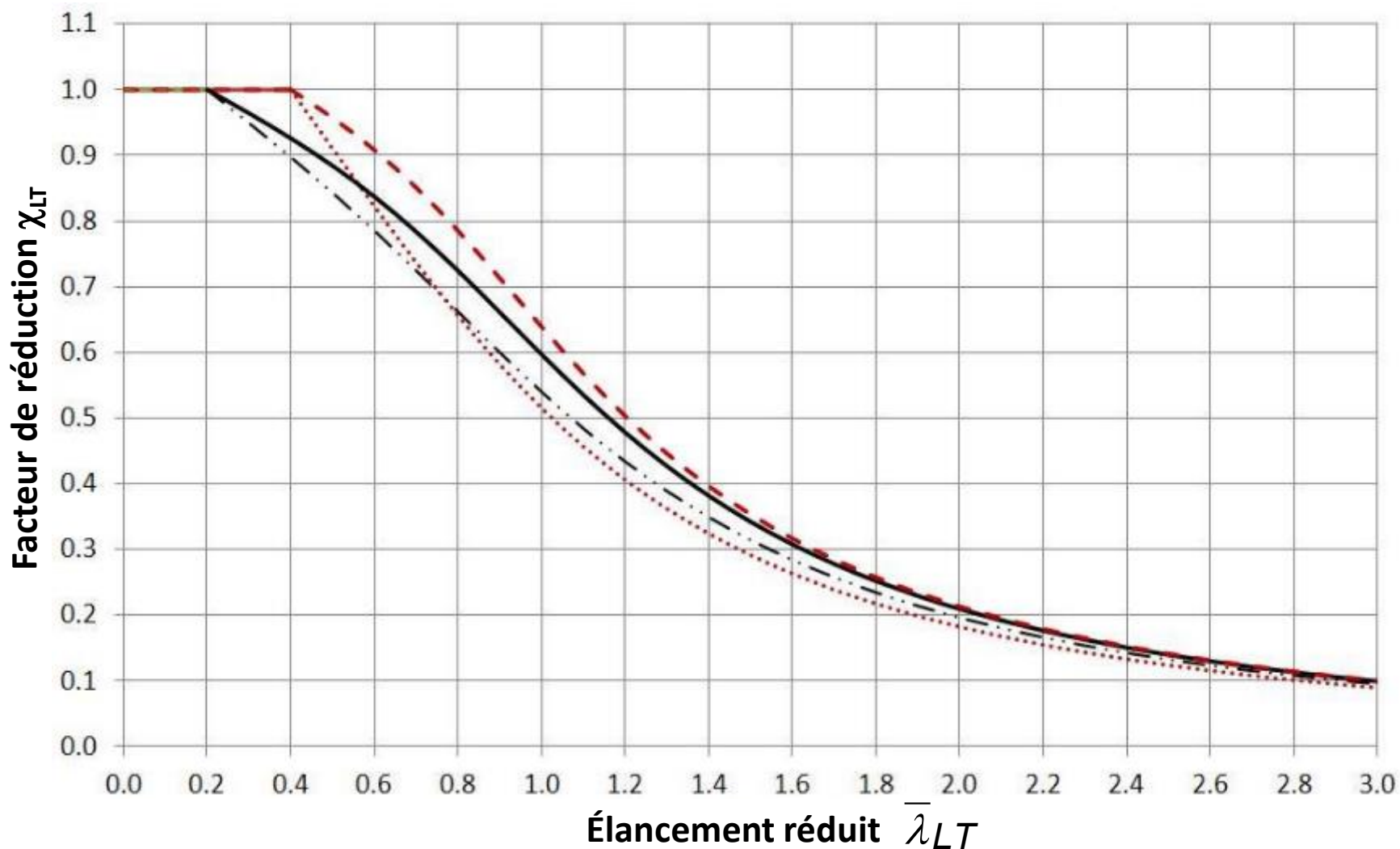
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{mais} \quad \chi_{LT} \leq 1,0$$

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

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

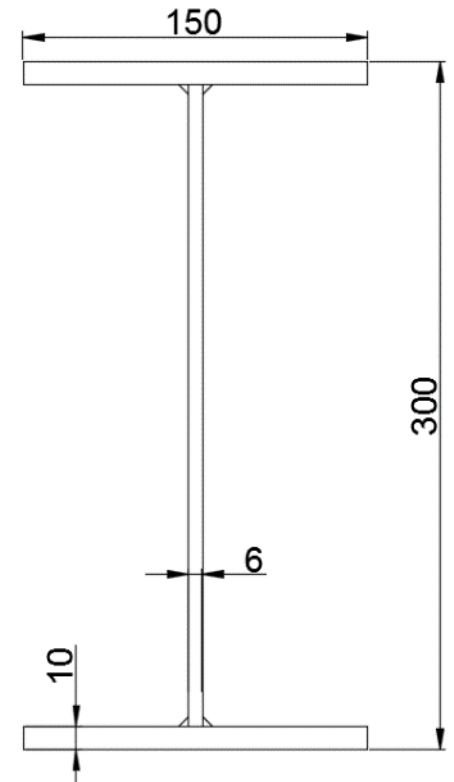
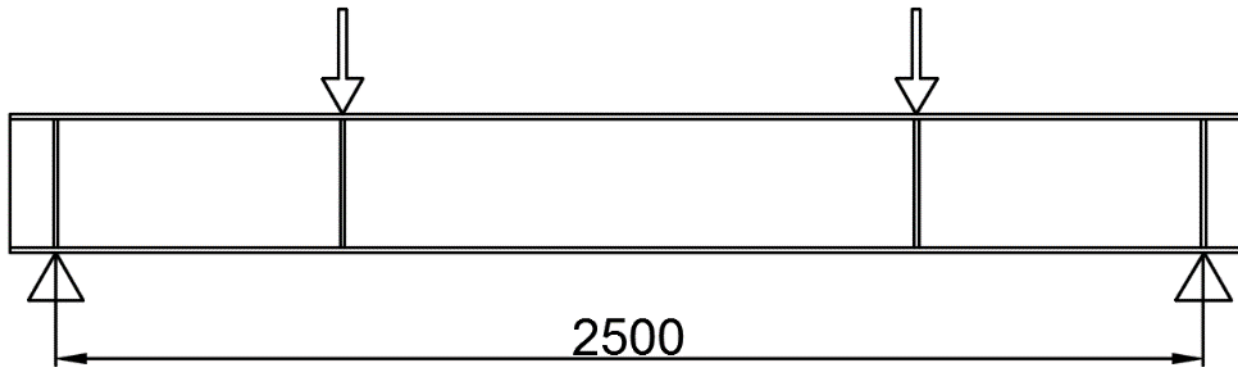
- Élancement réduit pour le déversement :

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

- 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

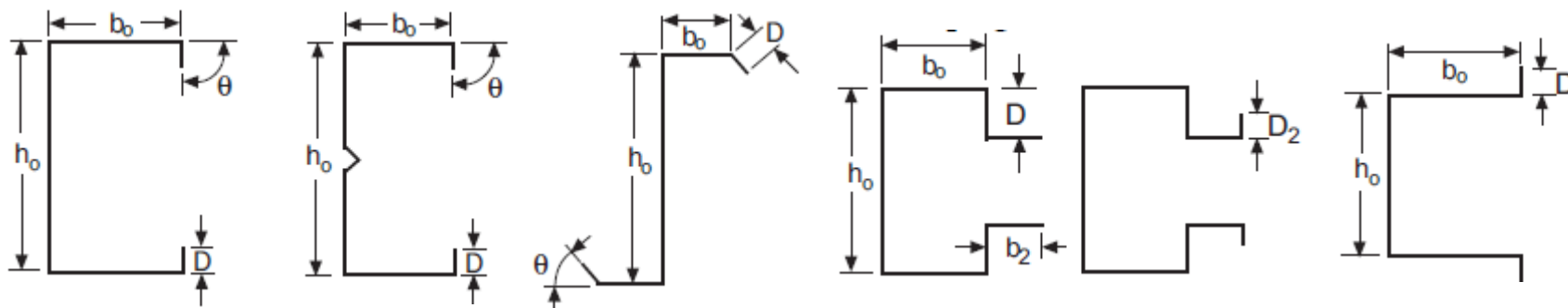
- Méthode de la « résistance directe » (DSM*)
 - Issue de la norme américaine
 - Utilisable pour les profils à parois minces
- Méthode de la « résistance continue » (CSM**)
 - Prend en compte les effets bénéfiques de l'écroutissage
- Méthode des éléments finis

*De l'anglais : « Direct Strength Method »

**De l'anglais « Continuous Strength Method »

Méthode de la « résistance directe »

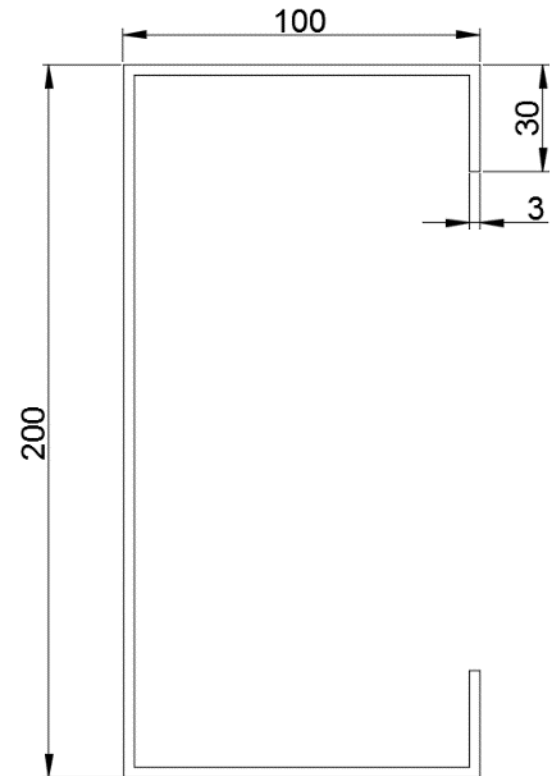
- Annexe 1 de l'AISI
- Méthode très simple et directe
- Utilisée pour les sections à parois minces



- 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/>

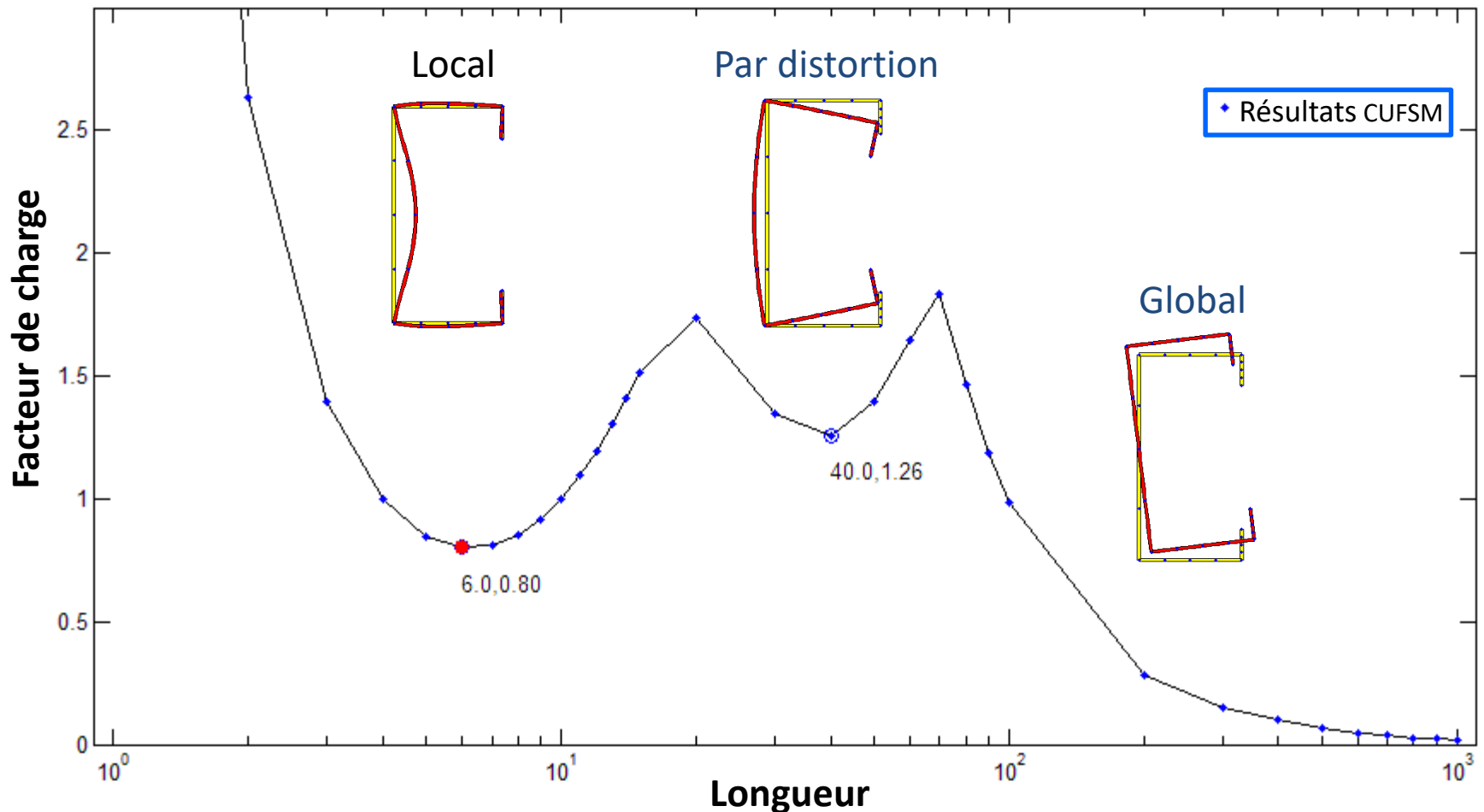
Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- 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

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

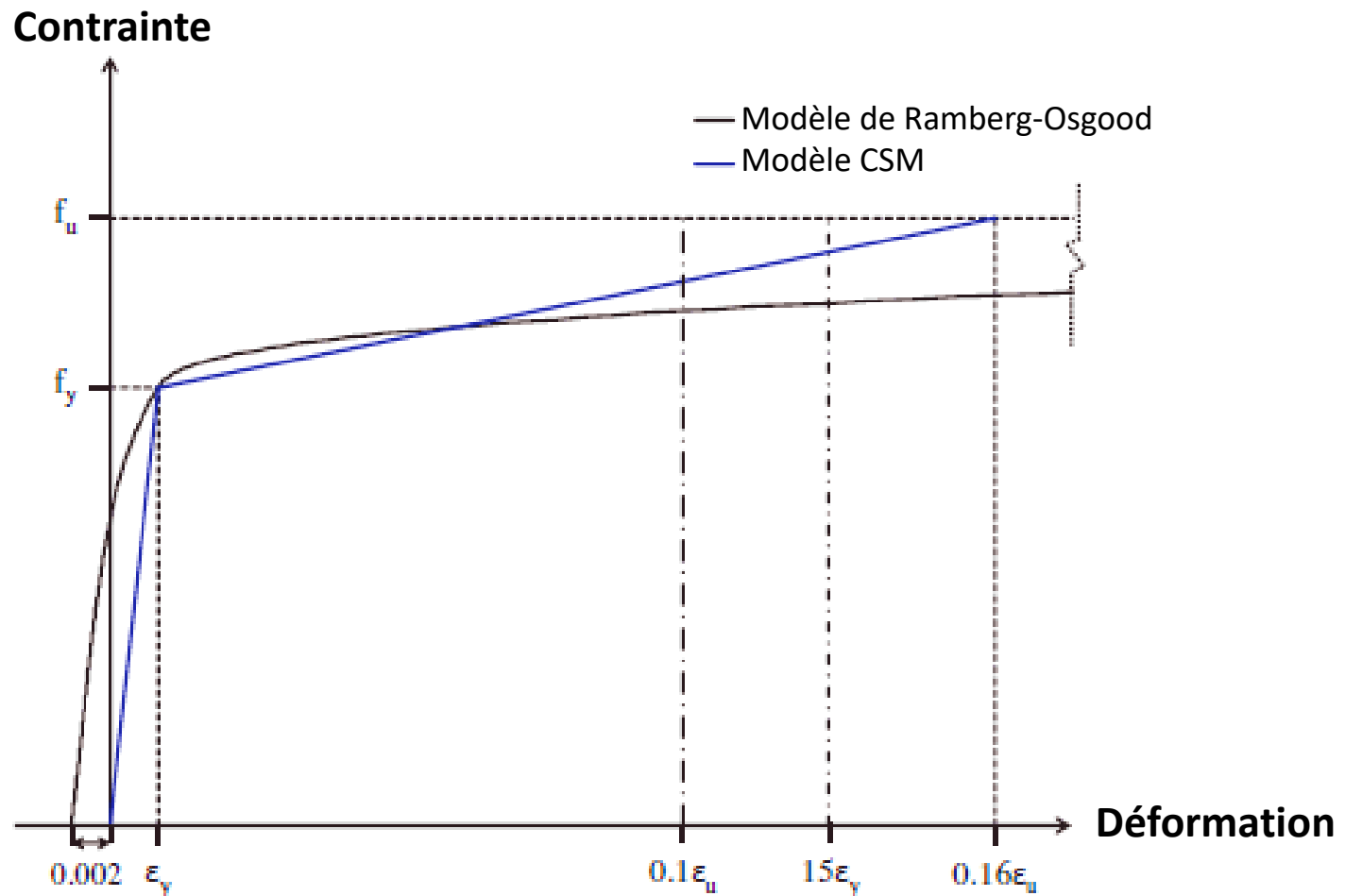
Méthode de la « résistance continue »

- 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 »

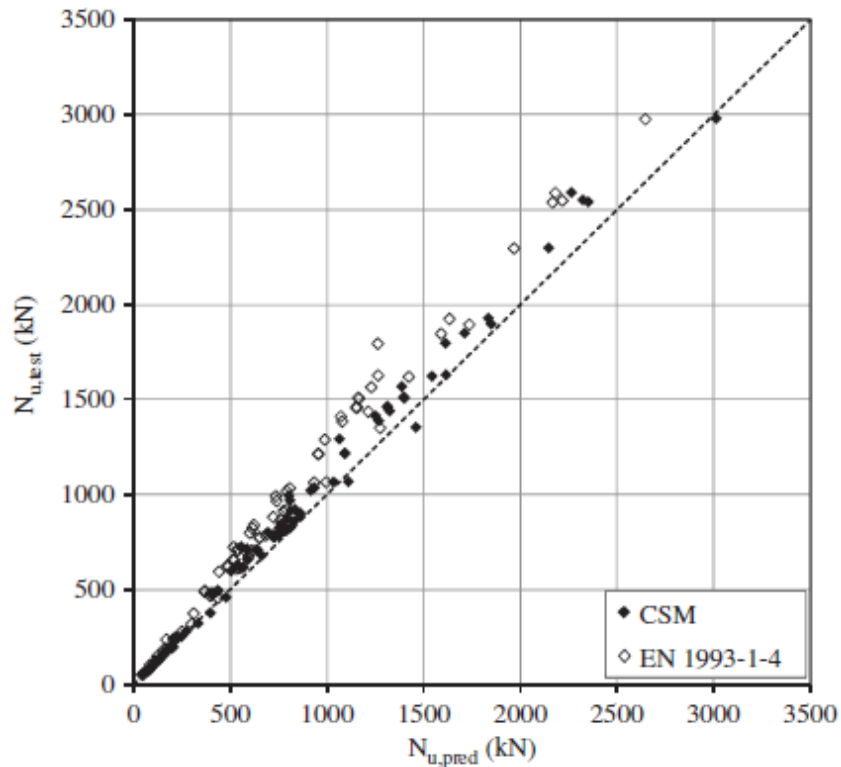
- Loi de comportement considérée dans la CSM :



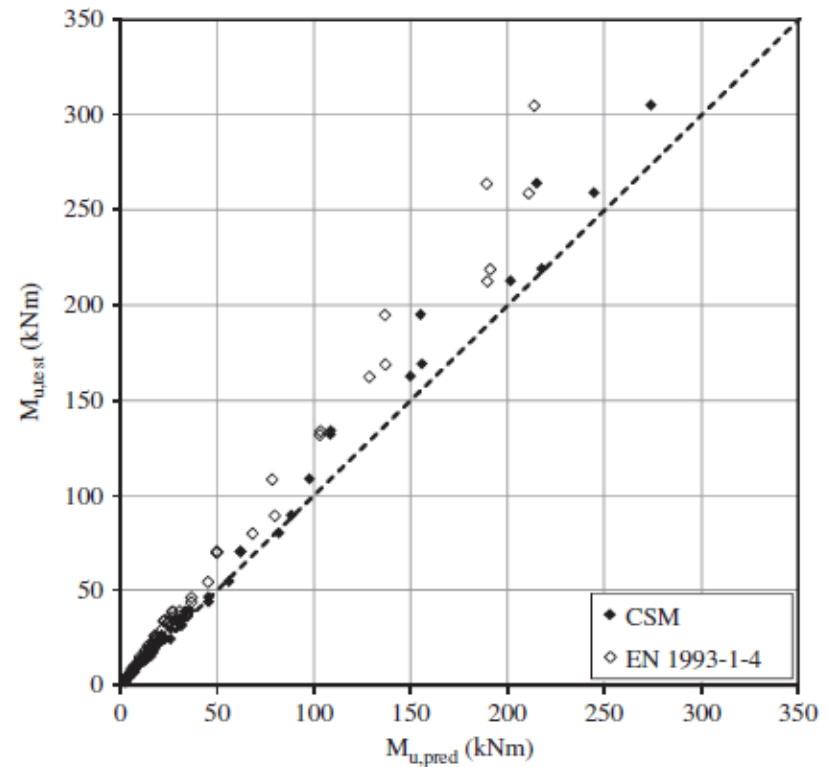
Méthode de la « résistance continue » ou CSM

Comparaison entre les résultats EC3 ou CSM avec des essais :

En compression



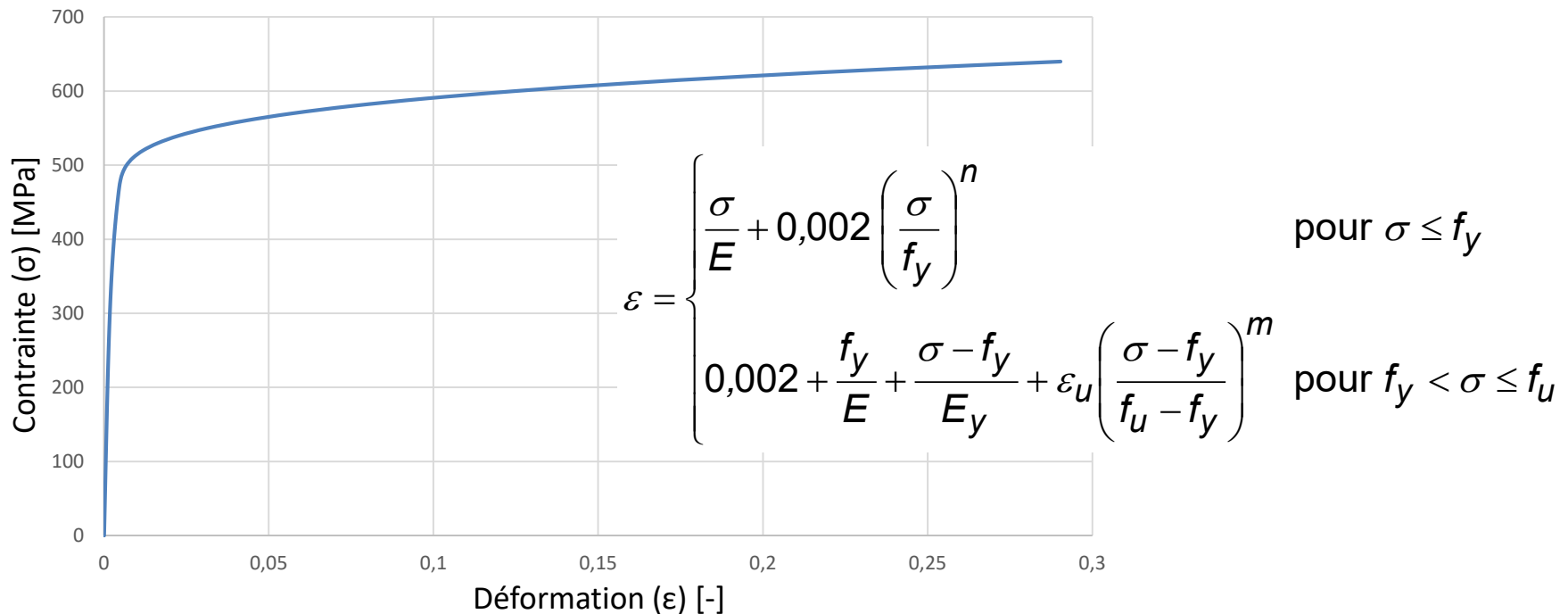
En flexion



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

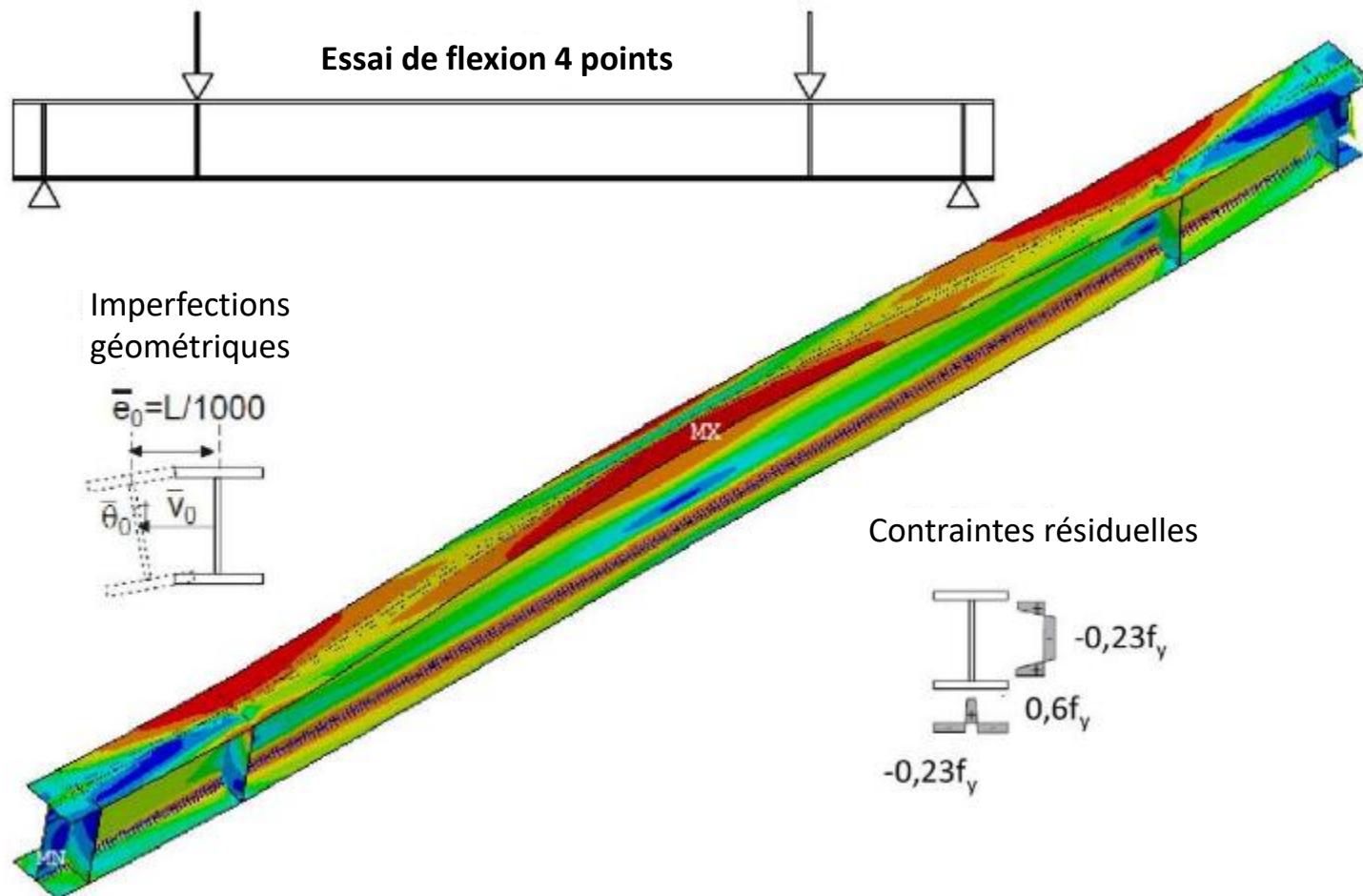
Méthodes des éléments finis

- 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)



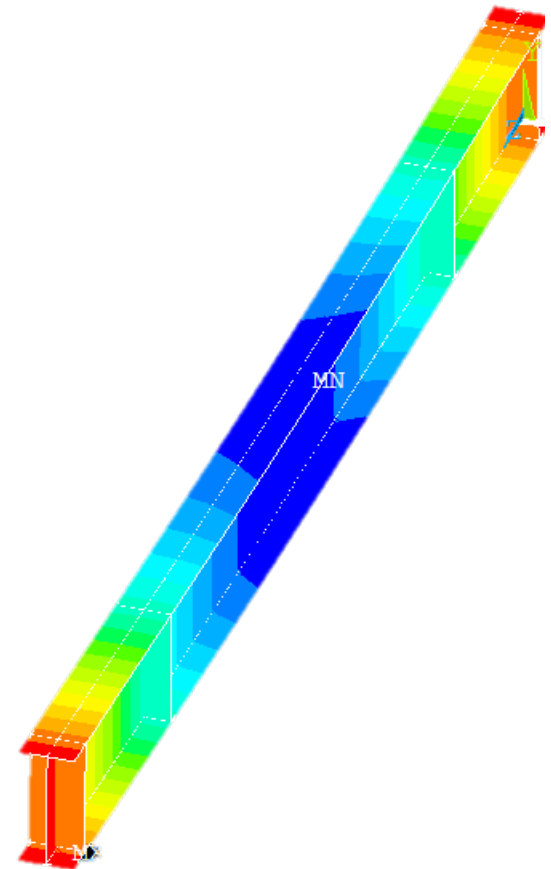
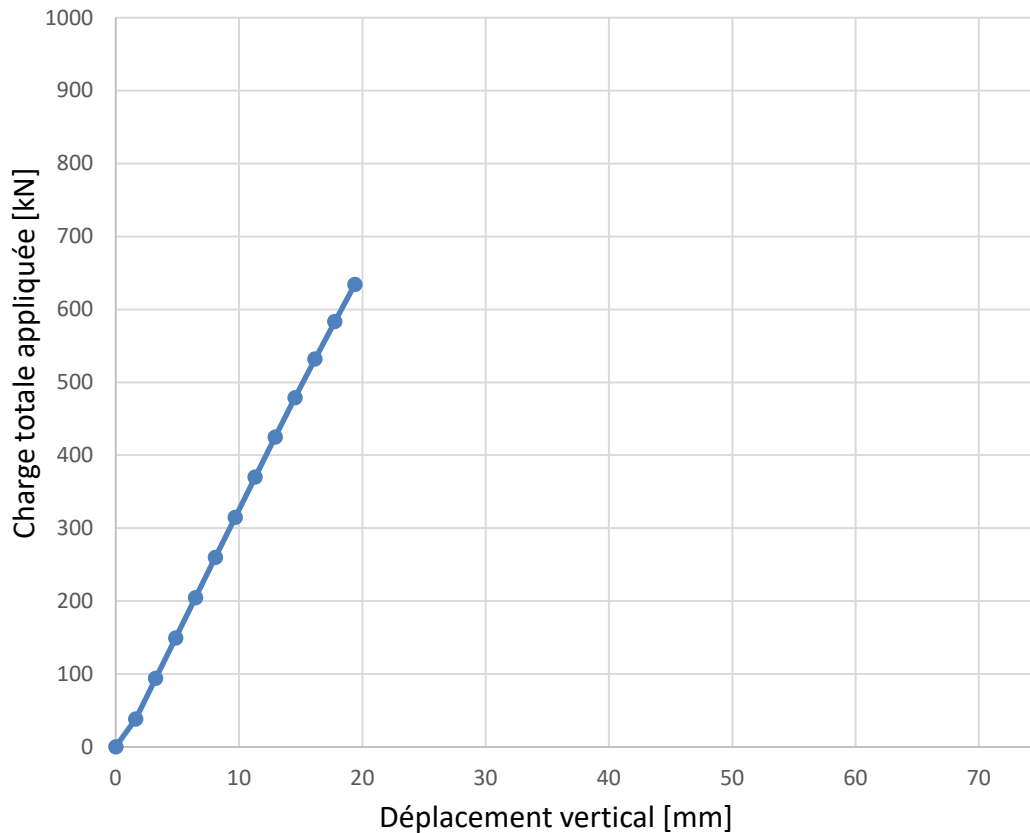
Méthode des éléments finis

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



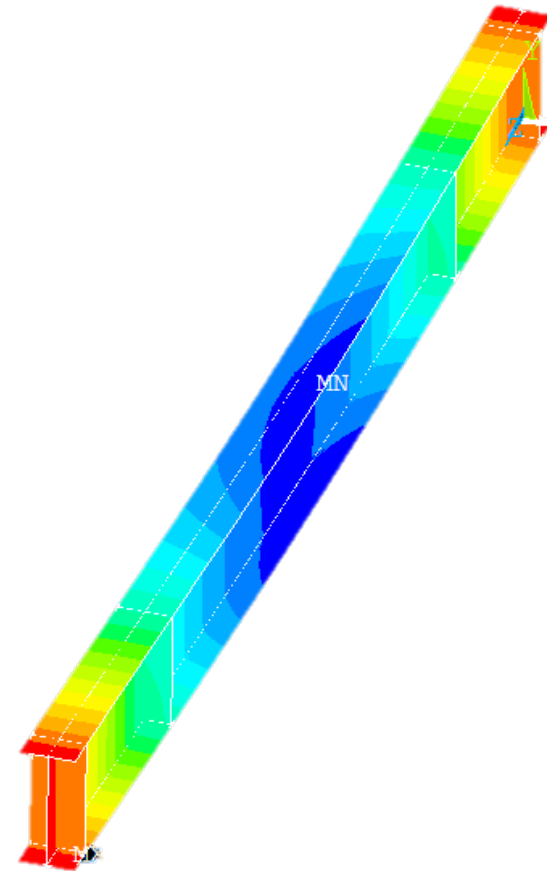
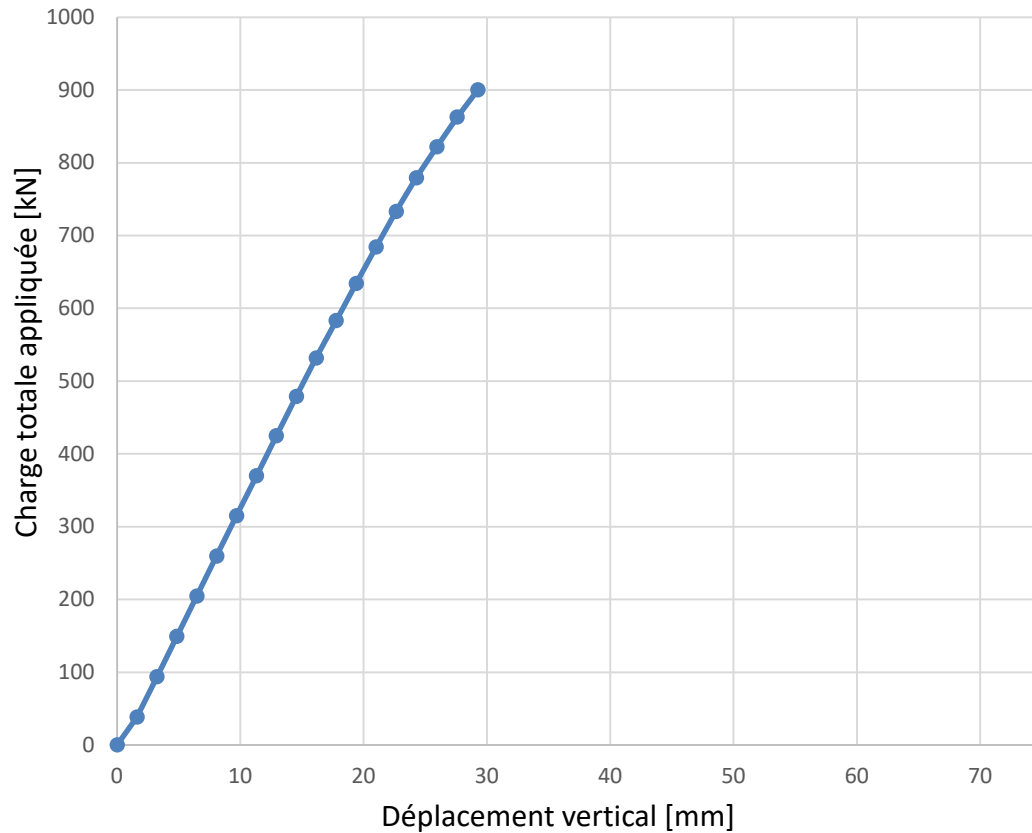
Méthode des éléments finis

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



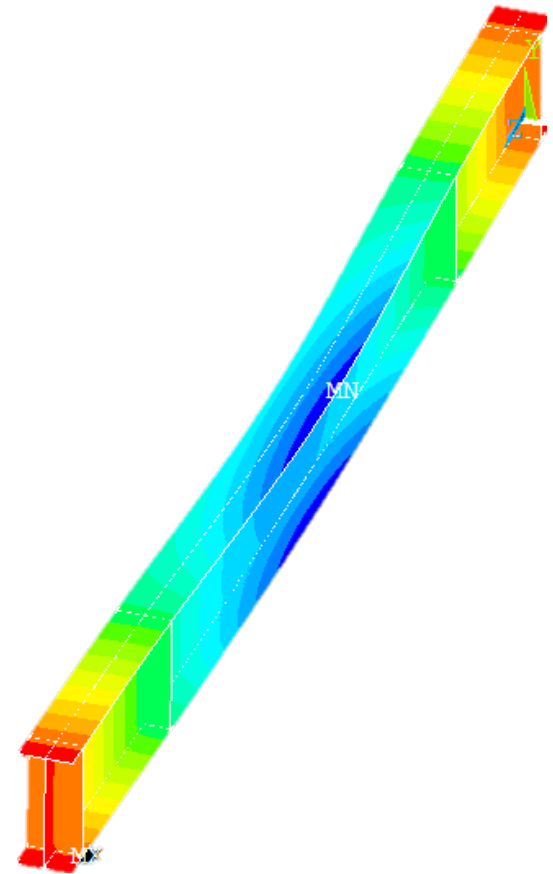
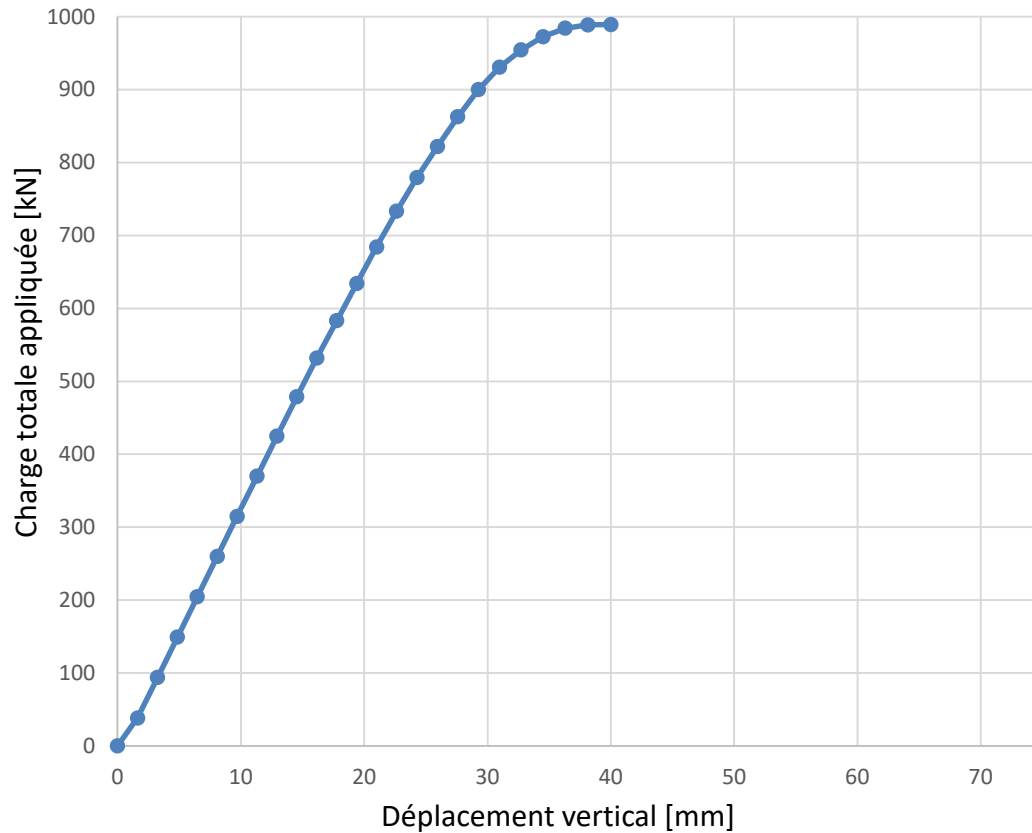
Méthode des éléments finis

- Résultats : phénomène d'instabilité → Début du déversement



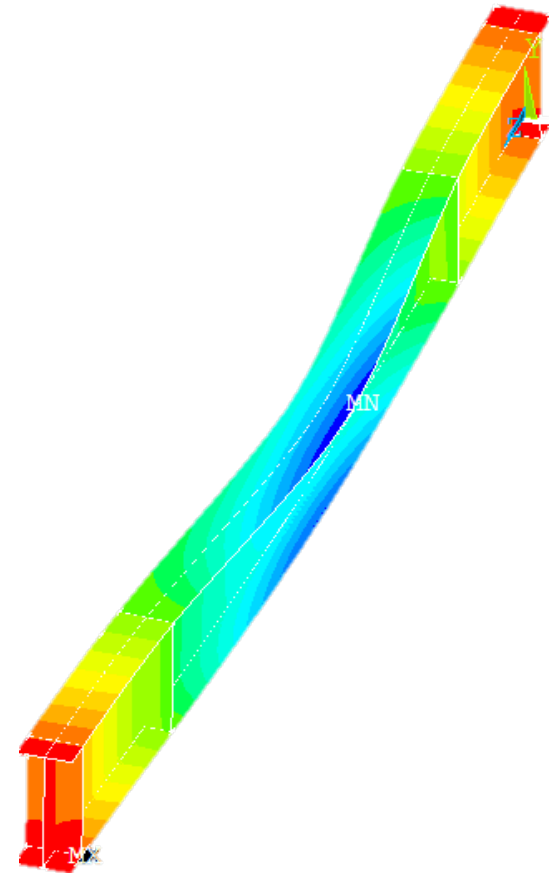
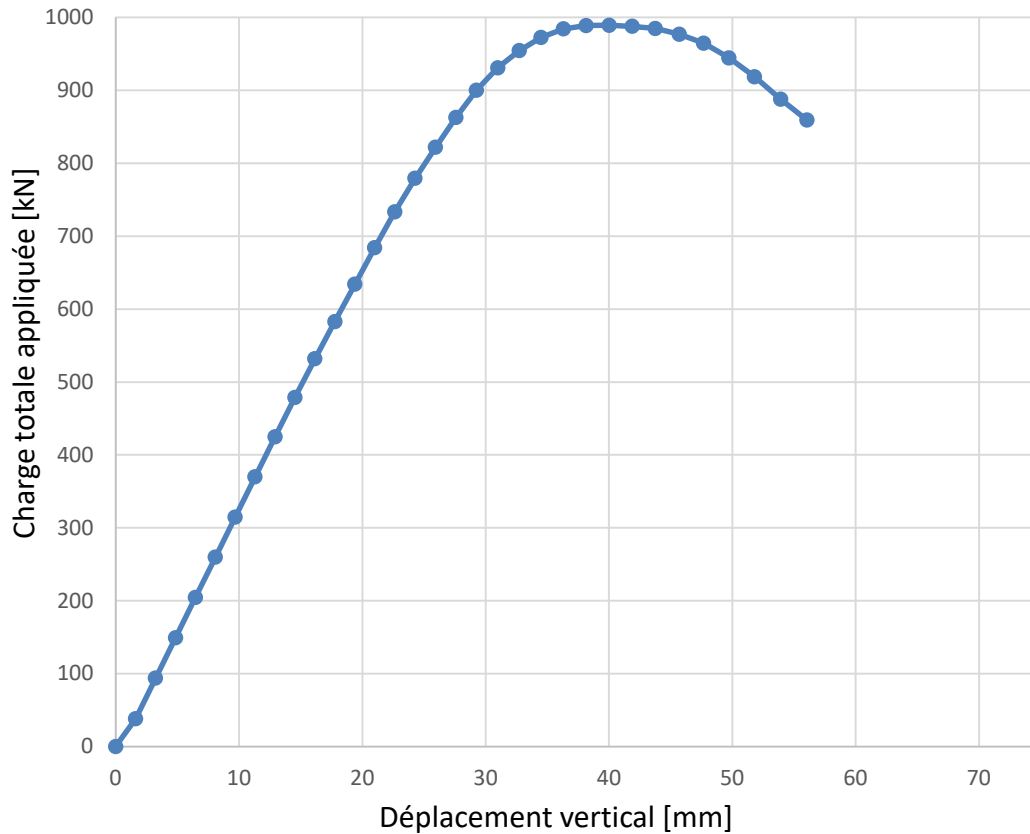
Méthode des éléments finis

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



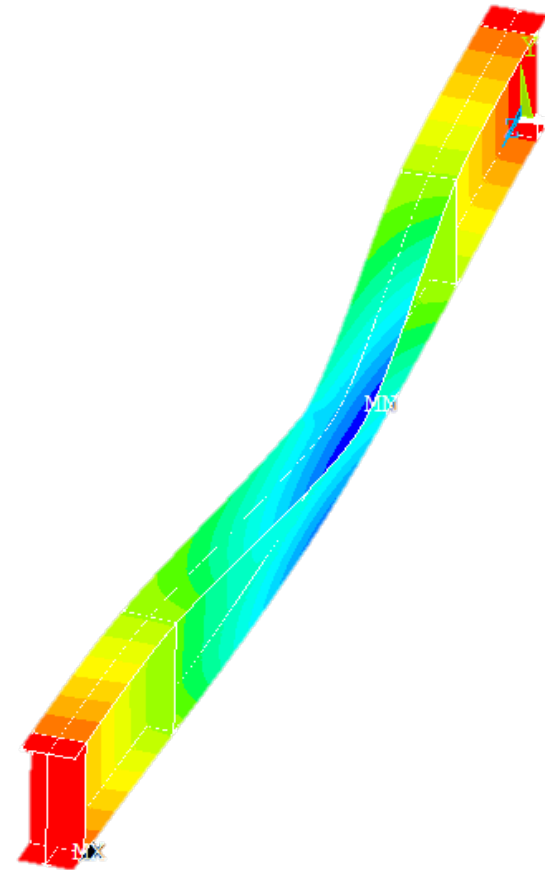
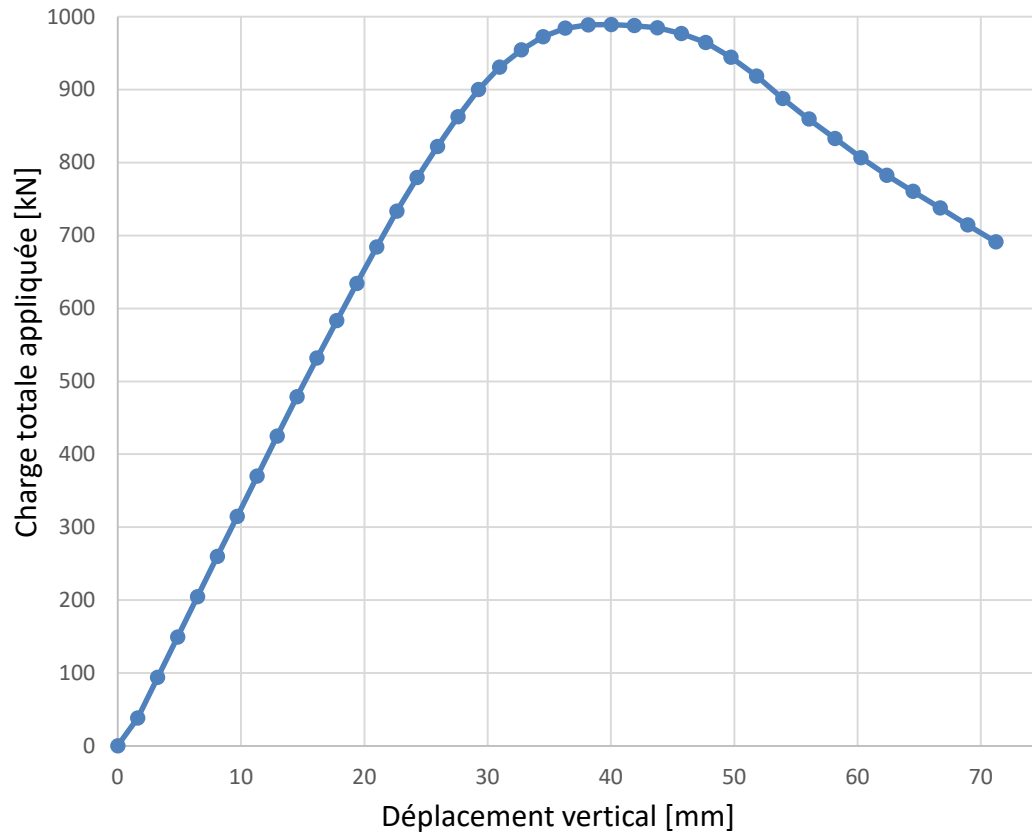
Méthode des éléments finis

— Résultats : Comportement post-instabilité



Méthode des éléments finis

— Résultats : Comportement post-instabilité



Partie 5

Flèches

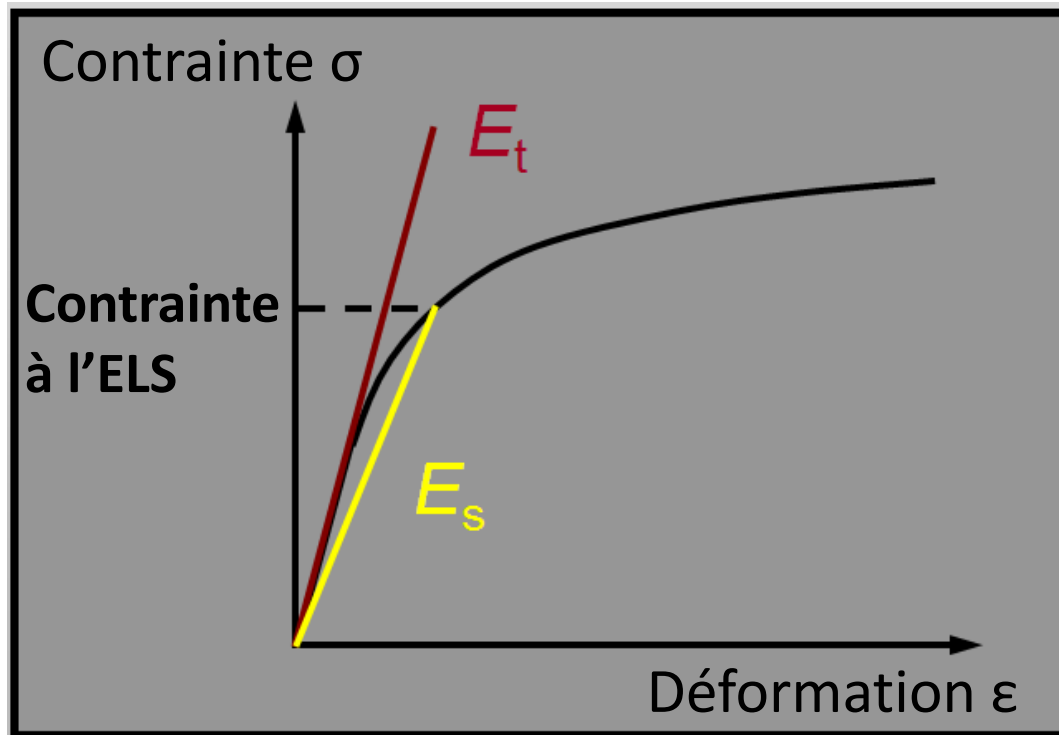


Flèches

- 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



STAINLESS STEEL P O R T A L

www.steel-stainless.org



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. The header features the title 'ONLINE INFORMATION CENTRE FOR STAINLESS STEEL IN CONSTRUCTION' in a light blue box. Below this is a dark navigation bar with six menu items: 'SPECIFICATION', 'CODES & STANDARDS', 'DESIGN', 'FABRICATION & INSTALLATION', 'CASE STUDIES', and 'RESEARCH'. The main content area is split into two columns. The left column contains the text 'Stainless steel at your fingertips...', a paragraph about the website's purpose, a 'Featured Resource' section for 'Thames Gateway Water Treatment', and a search bar with a 'GO' button. The right column features a large, high-quality photograph of a circular stainless steel structure, possibly a water treatment component, with a view through it.

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

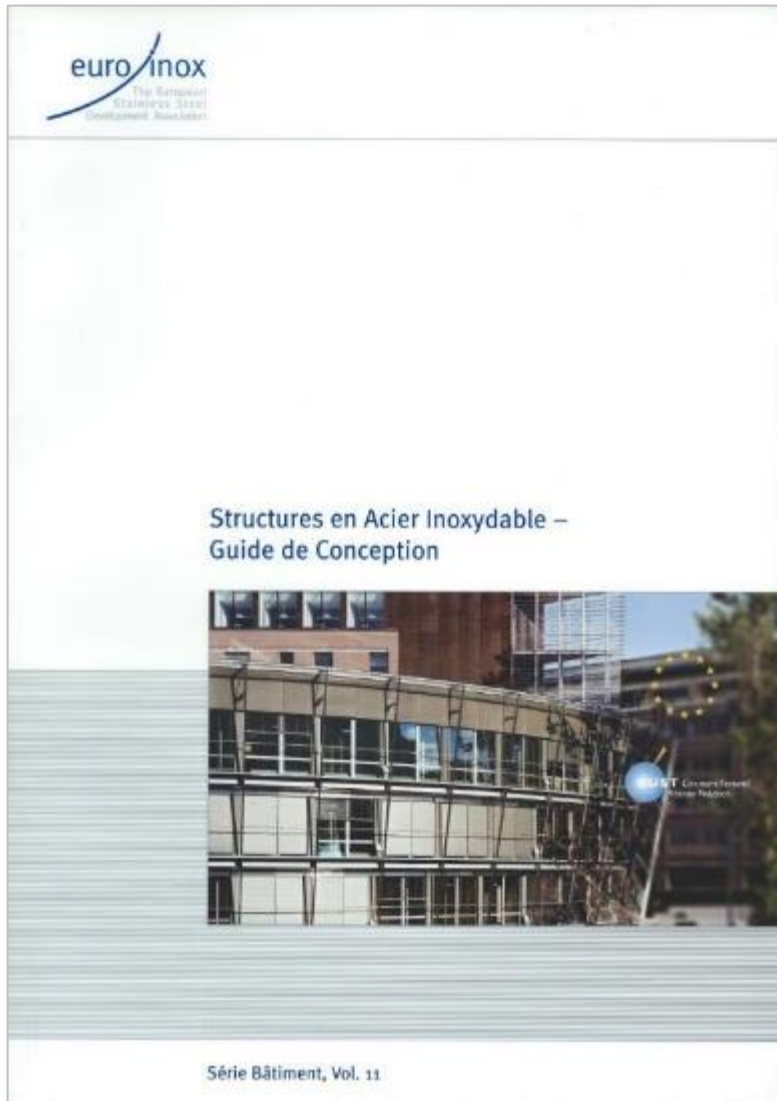
Standard non-austenitic austenitic steel grades were initially considered but discounted because of their relatively low design strength (220 N/mm²) and uncertainty regarding corrosion performance, given the roughness of the coated surface finish. Higher alloyed austenitics with better corrosion resistance, 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 !

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

Module 8 : États de surface des aciers inoxydables

Contenu

1. Finitions de l'acier inoxydable
2. Surfaces tridimensionnelles
3. Mailles tissées
4. Références

1 - Finitions de l'acier inoxydable^{1,2}

- Finitions d'usine
- Finitions polies et finitions brossées
- Finitions à motifs
- Finitions grenillées
- Finitions électropolies
- Finitions colorées
- Finitions colorées électrolytiquement
- Finitions à motifs et colorées électrolytiquement
- Revêtements organiques
- Finitions spéciales

Il existe de
nombreux états
de surface

Finitions d'usine laminées à froid^{1,3}

Selon le tableau 6 de la norme EN 10088-4 pour les finitions laminées à froid, complété par un guide des valeurs typiques de R_a^*

Symbole	Gamme de traitement	Notes	Valeurs typiques de R_a (μm)
2B	Laminé à froid, traité thermiquement, décapé, traité par skin pass	La plus courante des finitions « laminées à froid » disponibles. Surface non-réfléchissante, finition lisse avec une bonne planéité. La gamme des épaisseurs est limitée par les capacités de « skin pass » des fabricants.	0,1 à 0,5
2C	Laminé à froid, traité thermiquement, non décalaminé	Lisse avec de la calamine provenant du traitement thermique, convient pour des éléments qui seront usinés ou décalaminés ultérieurement ou pour des applications devant résister à de hautes températures.	-
2D	Laminé à froid, traité thermiquement, décapé	Gamme d'épaisseur de tôles plus minces. Pas aussi lisse que la qualité 2B mais convient à la plupart des besoins.	0,4 à 1,0
2E	Laminé à froid, traité thermiquement, décalaminé mécaniquement	Rugueux et terne. Appliqué habituellement aux aciers avec une calamine très résistante aux solutions de décapage.	-
2H	Laminé à froid, écroui	Écroui par laminage pour les types austénitiques afin d'améliorer la résistance mécanique. La finesse est similaire à 2B	-
2R	Laminé à froid, recuit brillant	Finition miroir hautement réfléchissante, très lisse. Souvent livrée avec un revêtement plastique pour l'empilage. Les objets manufacturés sont généralement mis en œuvre sans autre traitement ultérieur.	0,05 à 0,1
2Q	Laminé à froid, durci et revenu, exempt de calamine	Disponible seulement en types martensitiques (ex. 420). La calamine est évitée par un traitement thermique en atmosphère réductrice ou par décalaminage après traitement thermique	-

* R_a : Rugosité moyenne de la surface

(voir http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/RoughnessMeasurement_EN.pdf)

Voici les états de surface les plus courants

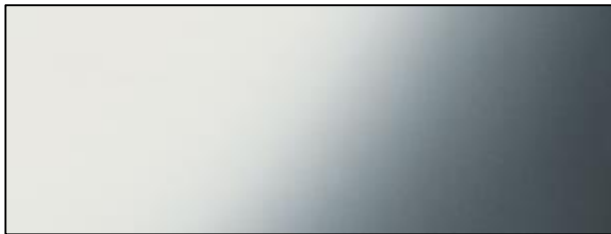
Finitions d'usine les plus courantes



2B Ce fini est obtenu comme le 2D mais il est suivi d'une légère passe finale de laminage, à l'aide de cylindres finement polis, qui donne à la surface un aspect gris lustré doux et réfléchissant. C'est le fini le plus largement utilisé aujourd'hui. Il constitue la base de la plupart des finitions polies ou brossées.



2D Ce fini est obtenu par laminage à froid suivi d'un traitement thermique et d'un décapage. L'aspect de surface mat et peu réfléchissant convient pour des besoins industriels ou de construction mais, au plan architectural, il est limité à des applications où l'esthétique n'est pas cruciale.



2R Il est obtenu par recuit brillant dans des atmosphères exemptes d'oxygène après un laminage à froid avec des cylindres polis. On obtient un fini hautement réfléchissant qui renvoie très clairement les images. Cette surface ultra-lisse est moins susceptible d'accueillir des produits contaminants transportés par l'air ou de l'humidité que d'autres finitions d'usine. Elle est, de plus, facile à nettoyer.

Finitions spéciales^{1,3}

Selon le tableau 6 de la norme EN 10088-4 pour les finitions laminées à froid, complété par un guide des valeurs typiques de R_a *

Symbole	Gamme de traitement	Notes	Valeurs typiques de R_a (μm)
1G or 2G	Meulé	Peut être basé sur des finitions d'usine** de type « 1 » ou « 2 ». Texture unidirectionnelle pas très réfléchissante.	-
1J or 2J	Brossé ou poli mat	Peut être basé sur des finitions d'usine** de type « 1 » ou « 2 ». Plus lisse que les G avec une texture unidirectionnelle pas très réfléchissante	0,2-1,0
1K or 2K	Poli satiné	Peut être basé sur des finitions d'usine** de type « 1 » ou « 2 ». C'est la plus lisse des finitions spéciales non réfléchissantes avec une résistance à la corrosion qui convient pour la plupart des applications extérieures.	< 0,5
1P or 2P	Lustré	Peut être basé sur des finitions d'usine** de type « 1 » ou « 2 ». Finition polie réfléchissante. Peut être fini miroir.	< 0,1
2F	Laminé à froid, traité thermiquement, skin passé à l'aide de cylindres rugueux	Surface uniforme mate non réfléchissante, peut être basée soit sur des finitions d'usine de type 2B ou 2R	-
1M or 2M	A motifs	Peut être basé sur des finitions d'usine** de type « 1 » ou « 2 ». Motif sur une seule face. Inclus des tôles à relief (finition d'usine « 1 ») & les finitions à texture fine (finition d'usine « 2 »)	-
2W	Ondulé	Profils laminés (formes trapézoïdales ou sinusoïdales par exemple)	-
2L	Coloré	Appliqué aux tôles plates (finitions de type 2R, 2P ou 2K) ou à motifs (2M) dans une gamme de couleurs	-
1S or 2S	Surface revêtue	Peut être basé sur des finitions d'usine de type** « 1 » ou « 2 ». Normalement revêtues d'un seul côté avec une couche métallique comme de l'étain, de l'aluminium ou du titane	-

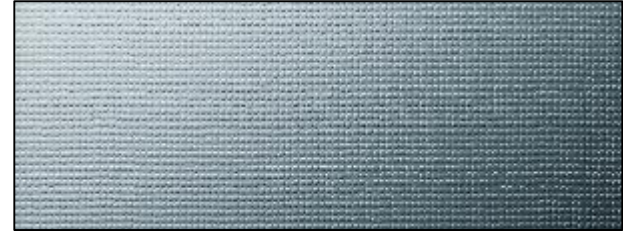
**Types de finition d'usine :
« 1 » : laminé à chaud
« 2 » : laminé à froid

* R_a : Rugosité moyenne de la surface

Il existe un très grand choix de finitions spéciales

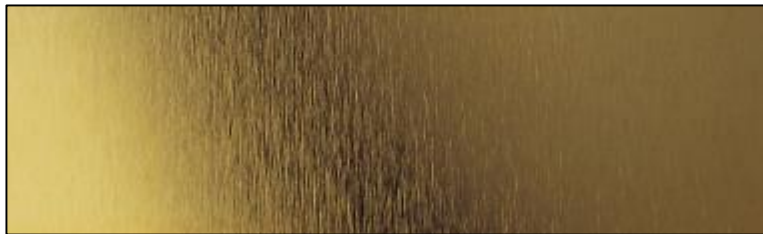
Finitions à motifs^{4,5,7}

Ces quelques exemples illustrent l'utilisation de tôles gravées sur une face seulement et désignées comme 2M. Une grande variété de formes est disponible



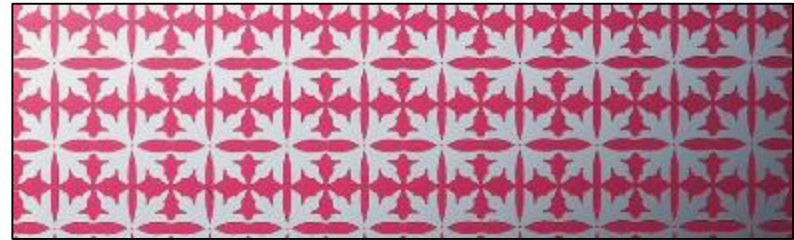
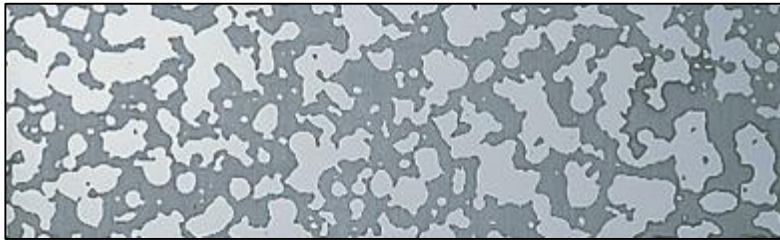
Finitions colorées^{4, 5,7}

Ceci n'est qu'une sélection des effets de couleurs qui peuvent être obtenus électrolytiquement sur de l'acier inoxydable



Motifs gravés^{4,5,7}

Des techniques de sérigraphie et de photorésistance ont été développées pour pouvoir transférer, sur des surfaces d'acier inoxydable, tout type de motif qui sera ensuite révélé par attaque chimique. Le décapage à l'acide est un procédé qui enlève une petite quantité de la surface du matériau. Les formes ainsi gravées sont mates et possèdent une apparence légèrement brute qui contraste bien avec les parties au fini poli ou satiné des zones lisses. Une couleur électrochimique peut être donnée aux surfaces traitées avant ou après décapage.



Finitions brevetées^{4,5}

Des finitions spécifiques & sur mesure peuvent être réalisées par des entreprises spécialisées
Quelques exemples sont montrés ci-dessous :



Electropolissage⁶



Il produit des surfaces réfléchissantes brillantes dont les caractéristiques sont :

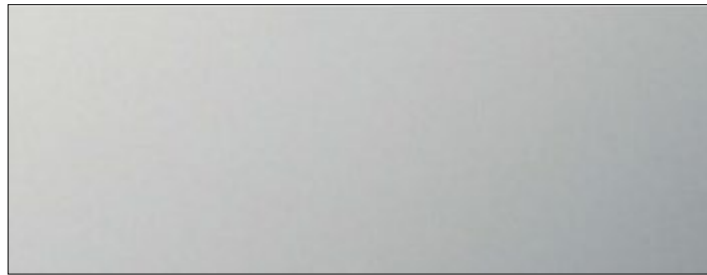
- Une résistance optimale à la corrosion pour toutes les nuances
- Une désinfection et un nettoyage aisés
- L'enlèvement facile des graffitis

Cependant :

- Les irrégularité des surfaces sont plus visibles
- De même que les dégâts dus aux rayures et aux dommages mécaniques

Finitions grenillées⁸

Cet aspect peut être obtenu par différents produits de grenailage, par exemple des billes de verre (image du haut) ou verre broyé (image du bas)



Important:

Le large choix de nuances inox disponibles permet aux concepteurs et aux architectes de trouver des solutions satisfaisantes à des problèmes très variés, qu'il s'agisse de résistance à la corrosion, de résistance mécanique, de mise en forme ou de soudage.

De même, les d'états de surface des inox offrent un choix d'aspects allant de mat à poli miroir, une diversité de textures, une palette de couleurs permettant ainsi aux architectes de donner libre cours à leur créativité et leur imagination.

Toutefois, le choix d'états de surface à forte réflectance requiert la prise en compte du risque d'éblouissement. C'est le cas notamment des façades exposées au soleil et des surfaces concaves qui méritent une attention particulière.

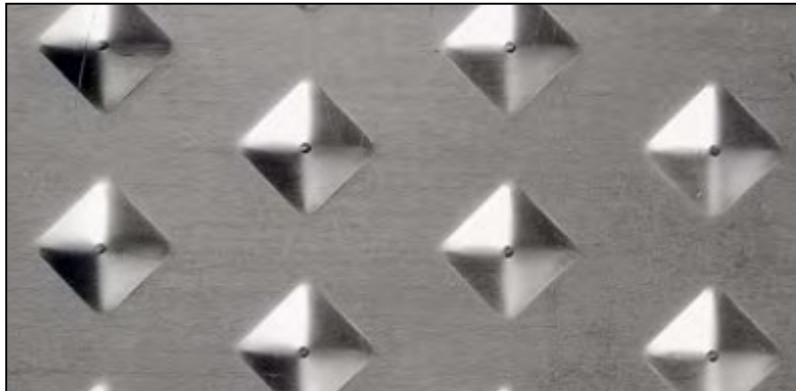
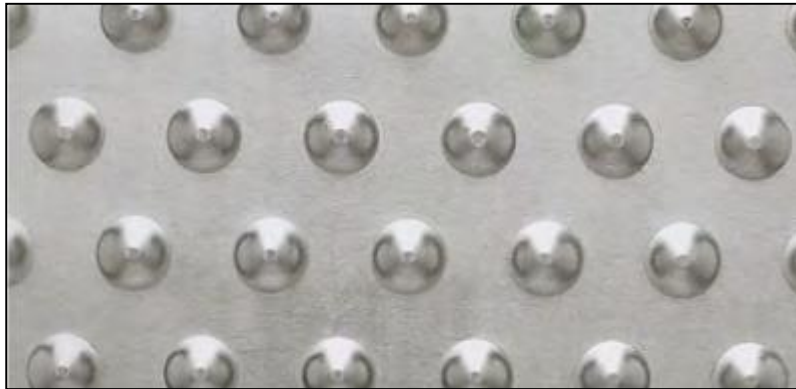
Les architectes utilisent tous les jours la palette des finitions de surface disponibles avec l'acier inoxydable⁷

Dans le Module 2 sont présentés quelques exemples de bâtiments pour lesquels la finition de surface est essentielle à l'esthétique

2 – Finitions tridimensionnelles⁹

c'est-à-dire avec des motifs tridimensionnels plus profonds que ceux obtenus par gravage. Elles sont obtenues par embossage, gaufrage, poinçonnage, découpage, profilage, généralement à l'aide de machines pilotées par ordinateur

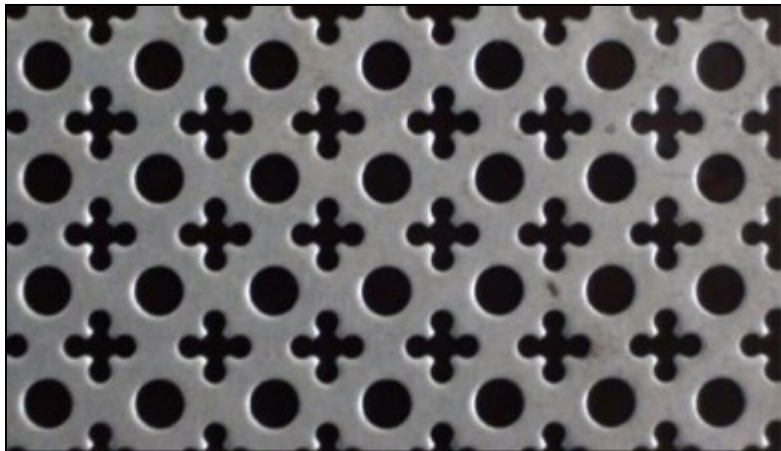
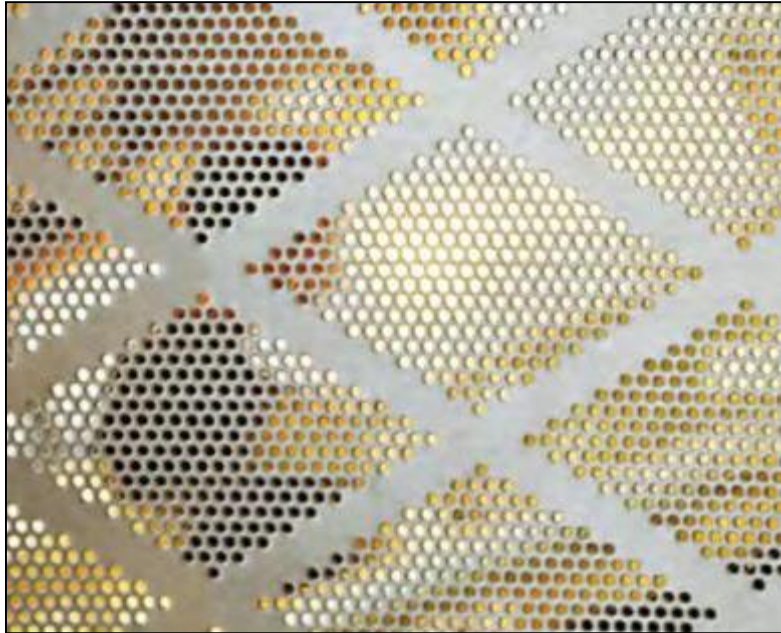
Finitions embossées avec motifs en relief⁹



Formes irrégulières⁹ (formage fluide)



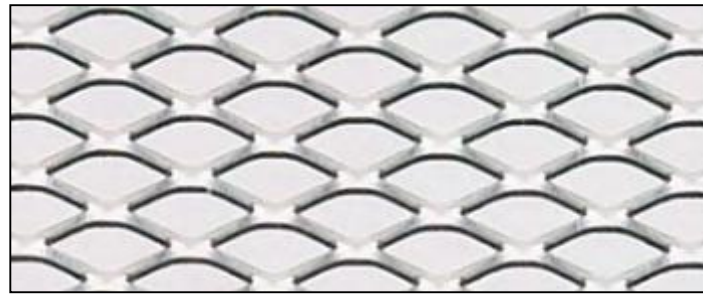
Tôles perforées⁹



Panneaux de verre semi-transparent par tôle perforée¹⁰

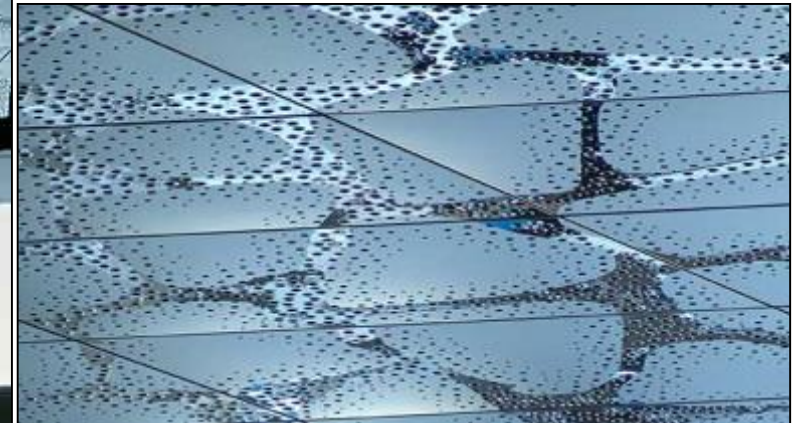


Tôles déployées



Combinaison de techniques¹¹

Bâtiment à Waterfront Stockholm : Plafond en tôles d'acier inoxydable perforées et colorées qui reproduisent l'image de la débâcle en bas à droite

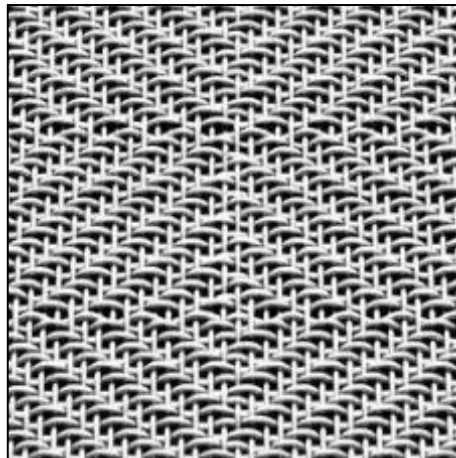
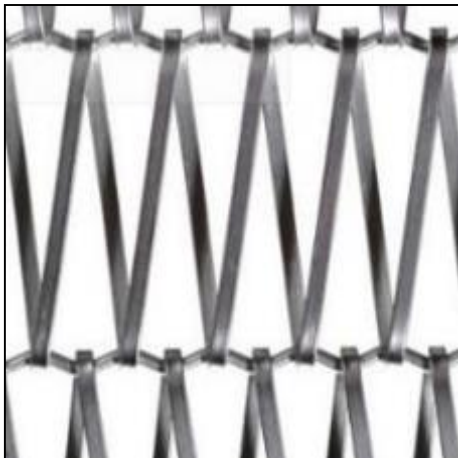
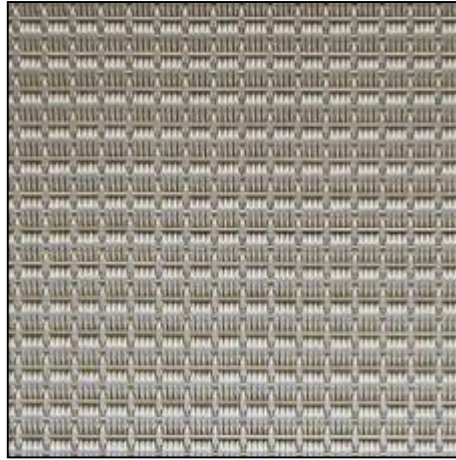
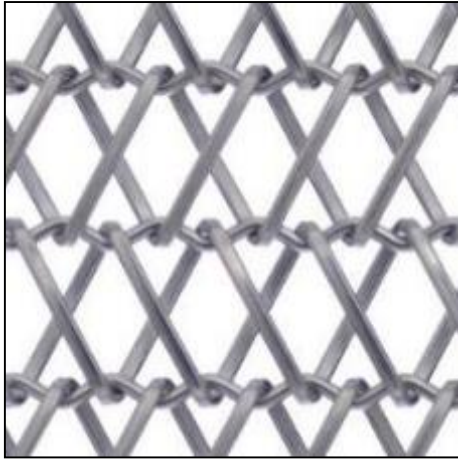


Débâcle : caractérise la fonte des glaces d'un fleuve ou de la mer.



3 – Mailles tissées

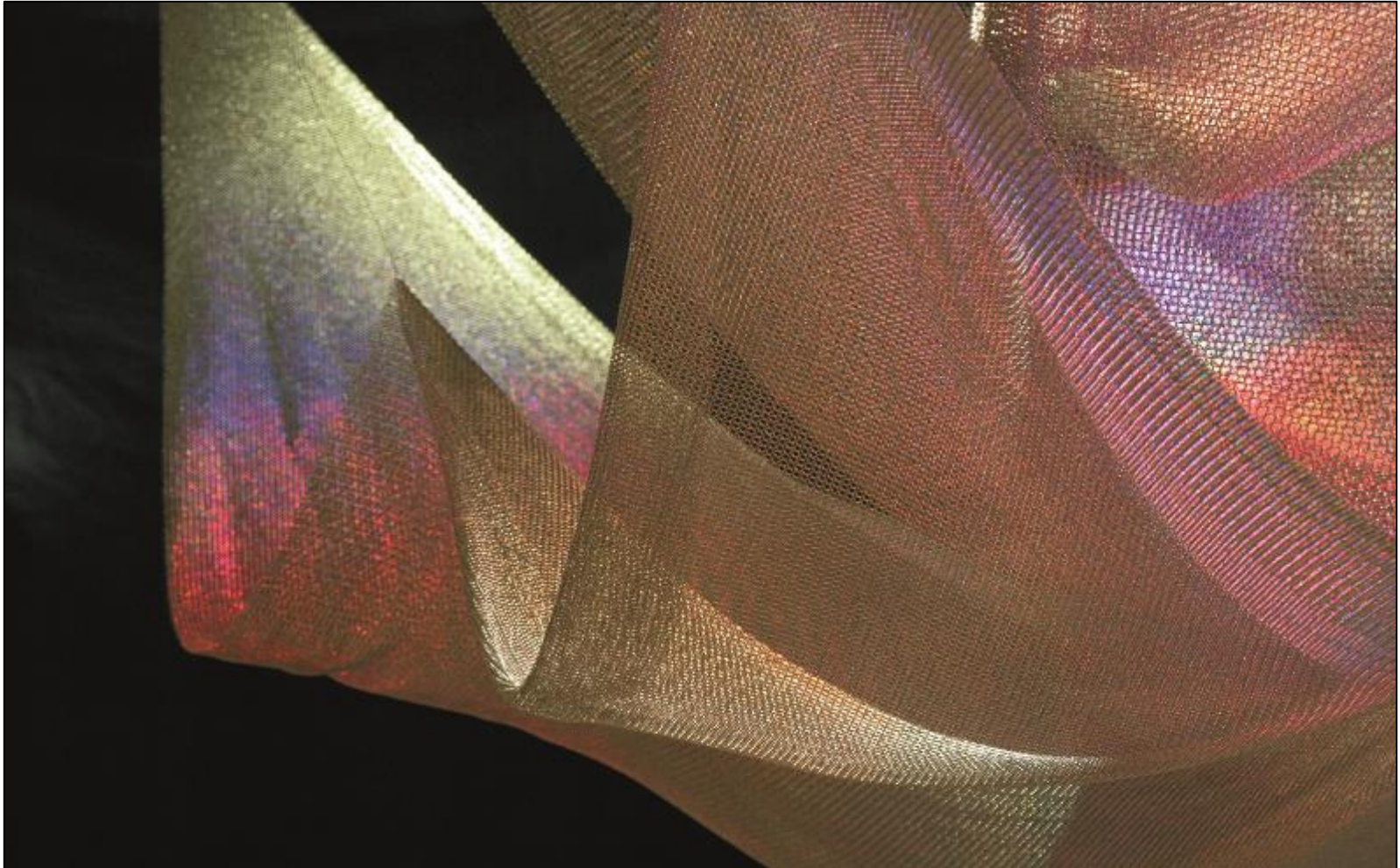
Standard¹²⁻¹⁴



Un très large éventail de formes et de motifs tissés est disponible avec des possibilités de réglage de :

- la rigidité
- la surface ouverte
- la diffusion de la lumière
- la transparence acoustique
- la couleur
- etc...

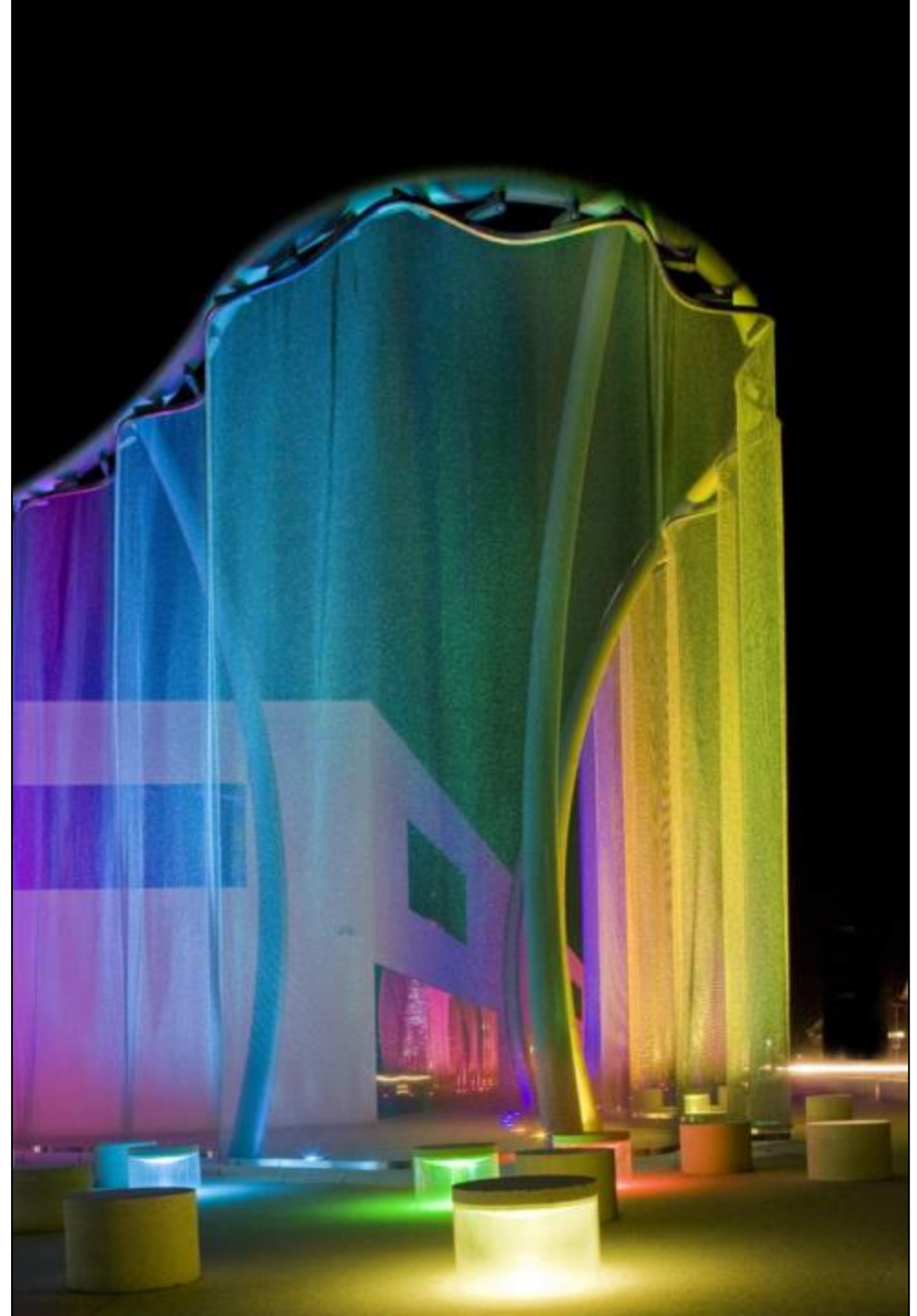
Exemple de décoration avec des mailles en acier inoxydable



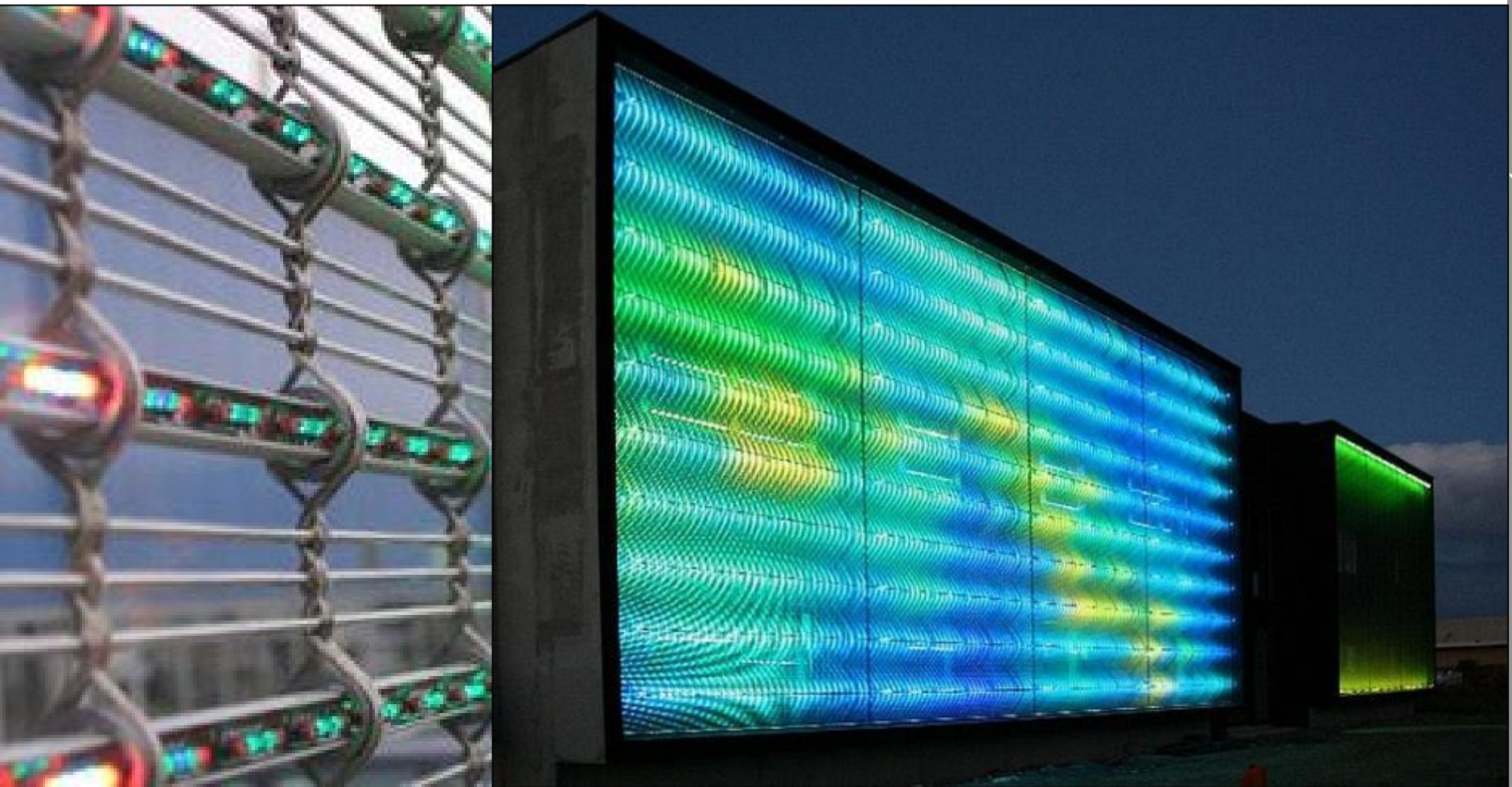
Décoration extérieure avec mailles en acier inoxydable

Les mailles d'acier inoxydable sont largement utilisées en décoration.

Elles permettent de réaliser des effets spéciaux avec des éclairages LED par exemple comme le représente cette photo du siège de la société Swarovski au Tyrol



Tissage d'acier inoxydable avec LED¹³



4 - Références et sources

1. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Finishes02_FR.pdf
2. http://www.ssina.com/download_a_file/special_finishes.pdf
3. <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=47>
4. www.uginox.com/sites/default/files/public/Triptyque%20Lusignan_web.pdf
5. <http://www.poligrat.de/home/>
6. http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Electropolishing_FR.pdf
7. <http://www.legrand-sgm.fr/>
8. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/3D_Finishes_FR.pdf
9. <https://cambridgearchitectural.com/projects/ft-lauderdale-hollywood-international-airport-rental-car-center>
10. <https://www.exyd.com/waterfront-building.html>
11. <http://cambridgearchitectural.com>
12. <https://gkd.de/architekturgewebe/>
13. <http://www.diedrahtweber-architektur.com/de/anwendungen-architekturgewebe/medienfassade/>
14. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/RoughnessMeasurement_EN.pdf

Merci !

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

Module 9 : **Assemblage & Fabrication des aciers inoxydables**

Contenu

1. Assemblage
2. Fabrication

1 - Assemblage

Procédés d'assemblage applicables : tous !

Procédés (Réf.)	Vidéos	Procédé préféré pour
Soudage (1-5) (très utilisé)	Soudage MIG Soudage TIG Robots de soudage	Haute résistance des joints Non démontable
Fixations mécaniques (très utilisées)	Exemple Webinar	Faciles à utiliser sur chantier Permettent d'assembler des matériaux différents (bois, verre...) Démontables ultérieurement
Brasage	Brasage	Étanchéité à l'eau (utilisé principalement en toiture)
Sertissage mécanique Pliage Autres....	Exemple de sertissage	Assemblage permanent de tubes Étanchéité à l'eau (utilisé principalement en toiture)
Collage (encore peu utilisé mais en augmentation)		Intégrité de la finition de surface

Soudage à l'arc

Avantages du soudage à l'arc

- Les caractéristiques des soudures sont celles du métal recuit
- Donne les assemblages les plus résistants
- Peut être exécuté à l'atelier et même sur chantier
- Peut assembler des éléments minces et épais de toutes formes
- Peut assembler des métaux semblables ou dissemblables (habituellement de l'acier au carbone avec un choix correct du métal d'apport)
- Bonne résistance à la fatigue et aux chargements cycliques
- Même résistance à la corrosion et à la chaleur que le métal de base recuit

Limites du soudage à l'arc

- Pas possible avec toutes les nuances
- Exige des procédures et des opérateurs qualifiés
- Peut provoquer des distorsions dues à la chaleur
- Des traitements post-soudage sont nécessaires pour une bonne finition (sablage par exemple)
- Perte de caractéristiques mécaniques dans le cas de produits laminés à froid

Soudage à l'arc

[Vidéo : polissage d'une soudure](#)



Fixations mécaniques

Avantages des fixations mécaniques

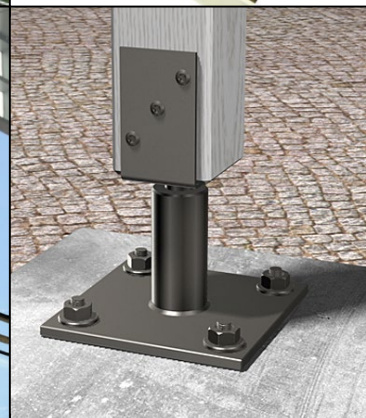
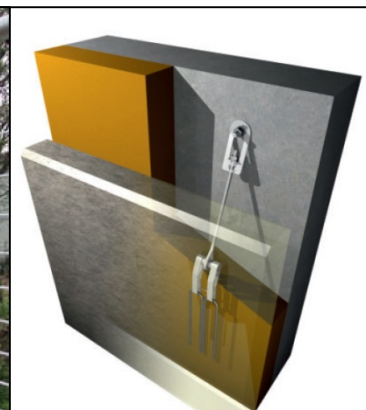
- Peuvent être démontées
- Idéales pour construire sur site
- Rapides
- Ne demandent pas de personnel qualifiés

Limites des fixations mécaniques

- Ne sont pas aussi résistantes que les soudures
- Peuvent provoquer des crevasses (voir le Module 5 concernant la résistance à la corrosion)

Sélection du type de fixation approprié:

L'Institut Allemand des Techniques de Construction a publié des recommandations pour la sélection des fixations selon la sévérité de leur environnement d'utilisation. Merci de vous reporter à la Référence 4 (Classes d'exposition) et au Tableau 8 (Nuances d'inox par classe)



* Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)



Sertissage

(procédé utilisé seulement pour les tubes)

Avantages du sertissage

- Étanchéité parfaite aux liquides et aux gaz
- Rapide
- Sans flamme
- Surfaces parfaitement propres
- N'exige pas une main-d'œuvre qualifiée

Limites du sertissage

- Ne peut pas être démonté
- Exige des manchons adaptés à chaque diamètre de tube

Collage

Avantages du collage

- Réalise un assemblage presque invisible
- Améliore l'apparence du produit
- Donne une distribution de contrainte uniforme et une plus grande surface d'appui
- Assemble des éléments minces et épais de toutes formes
- Assemble des métaux de même nature ou de nature différente
- Minimise ou évite la corrosion électrochimique (galvanique) entre métaux différents
- Bonne résistance à la fatigue et aux charges cycliques
- Fournit des joints aux contours lisses
- Rend les joints étanches face à des environnements variés
- Isole contre le transfert de chaleur et la conduction électrique
- Ne crée pas de distorsions dues à la chaleur
- Amortit les vibrations et absorbe les chocs
- Offre un rapport résistance/poids attractif
- Est souvent plus rapide ou moins onéreux que les fixations mécaniques

Limites du collage

- L'examen visuel de la zone collée n'est pas possible
- Exige une préparation soignée des surfaces, souvent avec des produits chimiques agressifs
- Peut nécessiter des temps de séchage longs, particulièrement à basse température
- Peut nécessiter des systèmes de maintien, de serrage, des fours et des autoclaves, non nécessaires généralement pour les autres méthodes d'assemblage
- Ne doit pas être exposé à des températures d'utilisation supérieures à 180°C environ
- Exige une méthodologie de contrôle rigoureuse, incluant une propreté stricte pour la plupart des adhésifs
- Dépend de l'environnement auquel il sera exposé

Applications de techniques de collage



Attache d'éléments de garde-corps (DeLo-Duopox AD895)

- Comble les jeux, convient pour les espaces de collage petits et grands
- Bonne résistance aux agents chimiques et au vieillissement
- Pour des utilisations intérieures ou extérieures
- Efficacité : système modulaire flexible pour la construction des garde-corps. Les étapes complémentaires nécessaires au soudage comme le ponçage ou le polissage sont ainsi évitées

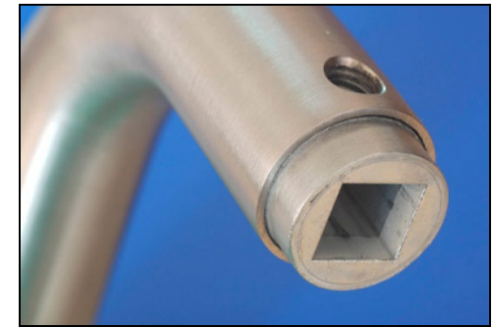


Les panneaux en acier inoxydable (nuance 1.4404) sont fixés aux murs extérieurs de ce bâtiment de bureau de 6 étages (Allemagne) par collage sans nécessiter aucun recours à des fixations mécaniques complémentaires

Choix des adhésifs pour collages structuraux [11]

	Compatible avec l'acier inoxydable	Types d'adhésifs pour collages semi-structuraux				
		Silicones	Polymère modifié avec silane	Polyuréthane	Acrylique	Époxy
Inox	oui	●	●	●	○	●
Acier carbone	oui	●	●	○	○	●
Acier au carbone peint	oui	●	●	X	○	○
Acier au carbone galvanisé	oui	●	●	X	○	○
Aluminium	oui	●	●	○	○	●
Bois	oui	●	●	○	○	●
Verre/Céramique	oui	●	●	X	○	●
Plastique PVC	oui	●	●	X	X	X
Plastique PA	oui	○	●	X	○	
Plastique PP/PE	non	X	X	X	X	X

● Hautement recommandable ○ Recommandable X Déconseillé



Le collage est utilisé pour assembler les poignées de porte



Pour les applications dans le bâtiment, le collage est une solution pratique lorsque l'acier inoxydable doit être fixé à une maçonnerie ou à des pierres naturelles

Références « Assemblage »

1. http://www.worldstainless.org/Files/issf/animations/WeldedFabrication/start_1.html
2. <http://www.wikihow.com/Weld-Stainless-Steel>
3. http://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/WeldingofStainlessSteelandotherJoiningMethods_9002_.pdf
4. <http://www.edelstahl-rostfrei.de/page.asp?pageID=1590>
5. <https://www.sciencedirect.com/book/9781855734289/metallurgy-of-welding>
6. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Adhesive_bonding_EN.pdf
7. <http://shura.shu.ac.uk/3115/>
8. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_for_Designers.pdf
9. http://www.delo.de/fileadmin/upload/dokumente/en/broschueren/Structural_Bonding.pdf
10. <https://www.ellsworth.com/globalassets/literature-library/manufacture/ellsworth-adhesives/ellsworth-adhesives-white-paper-structural-bonding.pdf>
11. <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781845694357>

2 - Fabrication

Des documents très complets sont disponibles (voir la liste des références).

La réf. 1 est un programme de formation dédié à la fabrication des aciers inoxydables

Le Module 2 répertorie un certain nombre d'applications en architecture, en bâtiment et en construction : des réalisations de toutes formes et de finitions variées sont couramment produites de nos jours

Nouveau !

Vidéos sur les procédés

- Élaboration et laminage d'acier inoxydable <https://www.youtube.com/watch?v=5zwwgl-pQ6kE>
- Découpe par cisailage et pliage https://www.youtube.com/watch?v=VMu7_W0QE3Y
- Découpe au jet d'eau <http://www.sastainless.com/videos/index.html>
- Emboutissage profond https://www.youtube.com/watch?v=n-ht_5Ysurc
- Formage de fils <https://www.youtube.com/watch?v=kDoSDiiZx6U>
- Machine à enrouler les ressorts <https://www.youtube.com/watch?v=SwY-RT4DBxY>
- Formage entre galets https://www.youtube.com/watch?v=44XD5mZoM_0
- Usinage (fraisage) <https://www.youtube.com/watch?v=LDxNDWObTyg>

D'autres vidéos sont disponibles sur Internet

Références « Fabrication »

1. <http://www.issftraining.org/>
2. http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Austenitics.pdf
3. http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex Stainless Steel 3rd Edition.pdf
4. <http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF The Ferritic Solution French.pdf>

Merci !

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

Module 10 : **Formes et disponibilité**

Pourquoi « Formes et disponibilité » ?

- Le coût et les délais de livraison sont très importants pour les architectes & les constructeurs
- Alors que les produits en acier inoxydable sont fabriqués dans une aciérie :
 - Il existe ensuite diverses chaînes industrielles pour ces produits selon leur degré de transformation vers le produit fini
 - et les fournisseurs et négociants offrent tout un ensemble de services
- Par conséquent, les coûts et les délais de livraison peuvent varier énormément

Quelques informations de base : la production de l'acier inoxydable

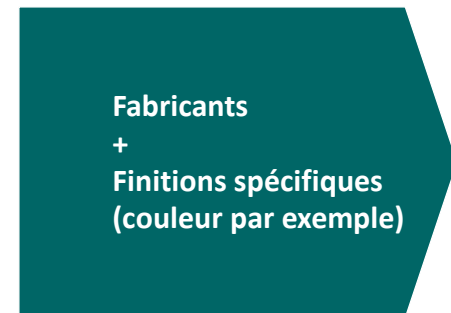
- [Vidéo](#) : Aciérie et laminage à chaud de bobines
- [Vidéo](#) : Laminage à froid de bobines
- [Vidéo](#) : Laminage à chaud de bobines
- [Vidéo](#) : Aciérie et formage à chaud de barres
- [Vidéo](#) : Laminage de fils machine
- [Vidéo](#) : Laminage de fils machine

Chaîne logistique pour l'acier inoxydable

SIMPLIFIÉ



Produits	Bobines, tôles, plaques Barres, fils Rond à Béton	Personnalisé : Découpage à longueur Découpage à la forme Polissage...
Services	Poids minimum 1 bloom Production sur commande Délai mini 2 à 3 semaines Prix minimal /kg	Petites commandes Disponible sur stock Temps de livraison court (1 à 3 jours) Prix majoré pour le service



Produits	Fixations Tubes Robinetterie Accessoires de tuyauterie	Service Disponible sur stock Personnalisation Temps de livraison court (1 à 3 jours) Prix majoré pour le service
-----------------	---	---

Produits plats

Départ usine

Clientèle

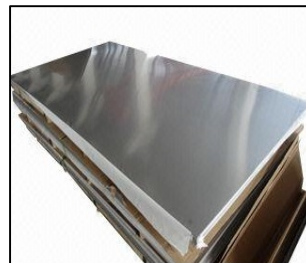
Bobines laminées à froid



Bandes laminées à froid



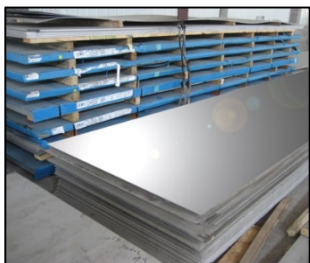
Tôles polies laminées à froid



Découpes laser



Plaques



Profils en I à partir de plaques



Profilés de portes et de fenêtres



Fixations



Tubes standards



Tubes profilés



Raccords de tuyauterie



Garde-corps



Produits longs

Départ usine

Barres



Tirants



Tiges filetées



Clientèle

Poignées



Rond à Bétons



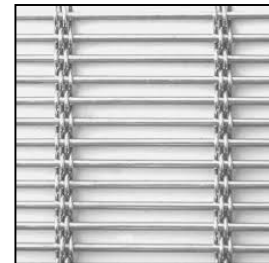
Câbles



Ancrages béton



Brise-soleil



Fil machine



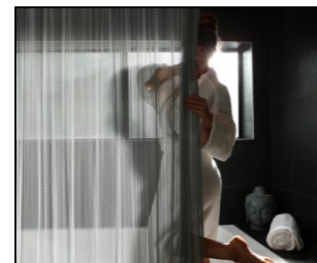
Mailles



Fixations



Rideaux de douche en mailles tissées



Tendances futures

L'urgence d'atténuer les effets du changement climatique et de développer l'économie durable vont conduire à des changements dans les années à venir.

L'offre de nouveaux produits devrait apparaître :

- Produits reconditionnés. Les aciers inoxydables issus de la déconstruction des bâtiments/équipements devraient être retraités puis rendus disponibles pour une nouvelle utilisation sans perte de caractéristiques mécaniques.
- Nouveaux produits plus minces et à résistance mécanique plus élevée, capables d'offrir la même performance de service avec moins de matière. Le développement des nuances « Lean Duplex » et des nuances austénitiques laminées à froid est déjà une réalité.

Références

Producteurs principaux de l'acier inoxydable:

<https://www.worldstainless.org/about-issf/issf-members/>

Merci !

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

Module 10 : **Formes et disponibilité**

Pourquoi « Formes et disponibilité » ?

- Le coût et les délais de livraison sont très importants pour les architectes & les constructeurs
- Alors que les produits en acier inoxydable sont fabriqués dans une aciérie :
 - Il existe ensuite diverses chaînes industrielles pour ces produits selon leur degré de transformation vers le produit fini
 - et les fournisseurs et négociants offrent tout un ensemble de services
- Par conséquent, les coûts et les délais de livraison peuvent varier énormément

Quelques informations de base : la production de l'acier inoxydable

- [Vidéo](#) : Aciérie et laminage à chaud de bobines
- [Vidéo](#) : Laminage à froid de bobines
- [Vidéo](#) : Laminage à chaud de bobines
- [Vidéo](#) : Aciérie et formage à chaud de barres
- [Vidéo](#) : Laminage de fils machine
- [Vidéo](#) : Laminage de fils machine

Chaîne logistique pour l'acier inoxydable

SIMPLIFIÉ



Produits

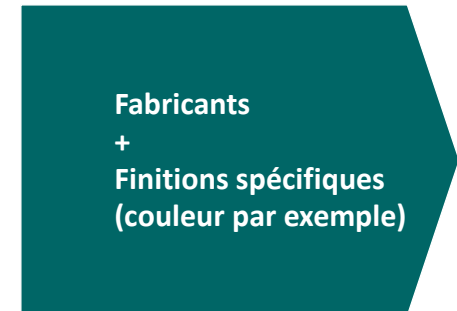
Bobines, tôles, plaques
Barres, fils
Rond à Béton

Personnalisé :
Découpage à longueur
Découpage à la forme
Polissage...

Services

Poids minimum 1 bloom
Production sur commande
Délai mini 2 à 3 semaines
Prix minimal /kg

Petites commandes
Disponible sur stock
Temps de livraison court (1 à 3 jours)
Prix majoré pour le service



Produits

Fixations
Tubes
Robinetterie
Accessoires de tuyauterie

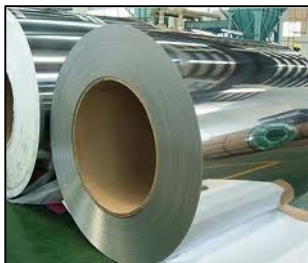
Service

Disponible sur stock
Personnalisation
Temps de livraison court (1 à 3 jours)
Prix majoré pour le service

Produits plats

Départ usine

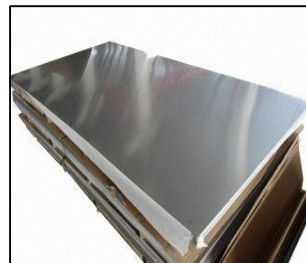
Bobines laminées à froid



Bandes laminées à froid



Tôles polies laminées à froid



Clientèle

Découpes laser



Plaques



Profils en I à partir de plaques



Profilés de portes et de fenêtres



Fixations



Tubes standards



Tubes profilés



Raccords de tuyauterie



Garde-corps



Produits longs

Départ usine

Barres



Tirants



Tiges filetées



Clientèle

Poignées



Rond à Bétons



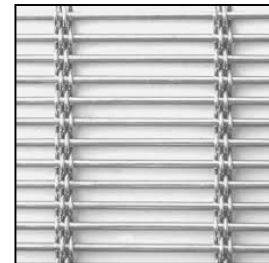
Câbles



Ancrages béton



Brise-soleil



Fil machine



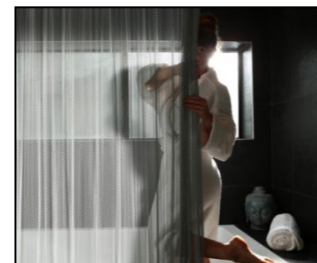
Mailles



Fixations



Rideaux de douche en mailles tissées



Tendances futures

L'urgence d'atténuer les effets du changement climatique et de développer l'économie durable vont conduire à des changements dans les années à venir.

L'offre de nouveaux produits devrait apparaître :

- Produits reconditionnés. Les aciers inoxydables issus de la déconstruction des bâtiments/équipements devraient être retraités puis rendus disponibles pour une nouvelle utilisation sans perte de caractéristiques mécaniques.
- Nouveaux produits plus minces et à résistance mécanique plus élevée, capables d'offrir la même performance de service avec moins de matière. Le développement des nuances « Lean Duplex » et des nuances austénitiques laminées à froid est déjà une réalité.

Références

Producteurs principaux de l'acier inoxydable:

<https://www.worldstainless.org/about-issf/issf-members/>

Merci !

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

Module 11 :
Développement durable et acier
inoxydable

Définitions

- **Gaz à Effet de Serre (GES)** : Équivalent-tonnes de CO₂ émis /1 tonne d'acier¹.
- **Potentiel de Réchauffement Global (PRG)** : Rapport, sans dimension, de l'aptitude de différents gaz à effet de serre (**GES**) à piéger la chaleur dans l'atmosphère par comparaison à celle du dioxyde de carbone (CO₂)⁷. Par exemple, le **PRG** du méthane est 21. Le **GES** primaire émis lors de la fabrication de l'acier est du CO₂.
- **Consommation d'énergie primaire (GJ/t)** : Consommation d'énergie nécessaire pour produire 1 tonne de matériau primaire (l'acier par exemple)¹.
- **Besoins bruts en énergie (GER)** : Quantité totale d'énergie nécessaire pour un produit⁸.
- **Efficacité des matériaux** : Mesure la quantité de matériau qui n'est pas éliminée de manière permanente, par enfouissement ou incinération, par rapport à la production d'acier brut¹.

Définitions

- **Inventaire du cycle de vie (ICV)** : Procédure structurée, globale et normalisée au niveau international. Elle quantifie toutes les émissions produites, les ressources consommées, les impacts environnementaux et sanitaires induits ainsi que l'épuisement des ressources tout au long du cycle de vie complet d'un produit³.
- **Coût Global de Possession (CGP)** : Outil pour estimer le coût total d'un bien dans la durée, incluant les coûts d'acquisition, d'utilisation, d'entretien et de destruction en fin de vie⁴.
- **Analyse du Cycle de Vie (ACV)** : Pour un système de produits et d'activités, c'est un outil d'aide à la quantification et à l'évaluation du fardeau environnemental et des impacts associés, de l'extraction des matières brutes jusqu'à la fin de vie puis de la gestion des déchets. Cet outil est de plus en plus utilisé par l'industrie, les gouvernements et les associations environnementales pour aider à la prise de décision dans les stratégies liées à l'environnement et au choix des matériaux.

Définitions

Indicateurs de sécurité :

■ Taux de Fréquence :

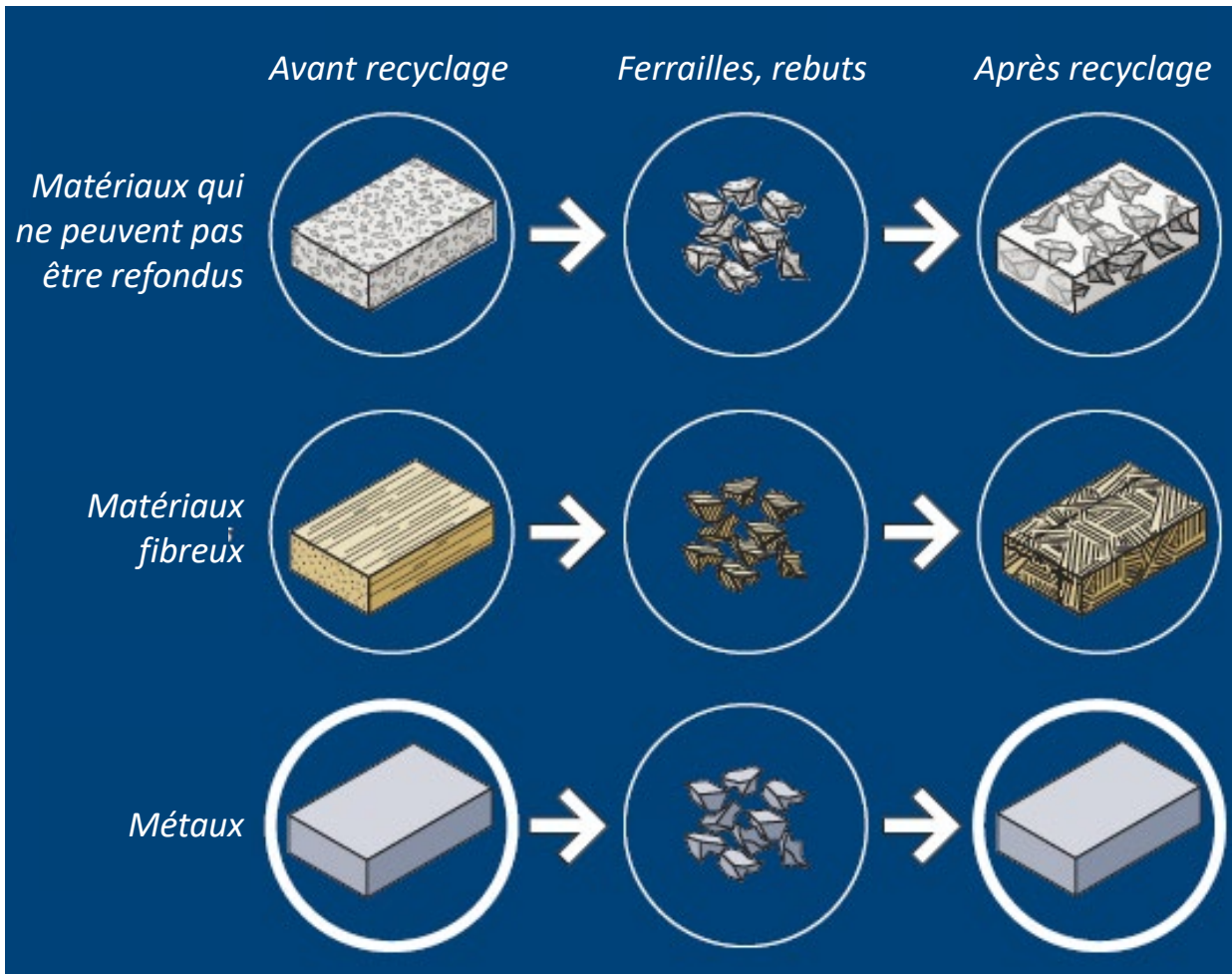
Nombre d'accidents avec arrêt de travail/1 million d'heures travaillées¹.

Indicateurs de recyclage :

- **Taux de recyclage** : Proportion de matériau collecté en fin de vie et qui rentre dans la chaîne de recyclage (par opposition à la proportion de matériau mis en décharge)⁵.
- **Contenu recyclé** : Proportion, en unité de masse, de matériau recyclé post- ou pré-utilisation incluse dans un produit⁶.
- **Fardeau de résidus solides (FRS)** : Il comprend les déchets miniers, les résidus, le mâchefer et les cendres de centrales électriques.

Commentaires sur les indicateurs :

Les indicateurs de recyclage ne prennent pas en compte la « dévalorisation* »



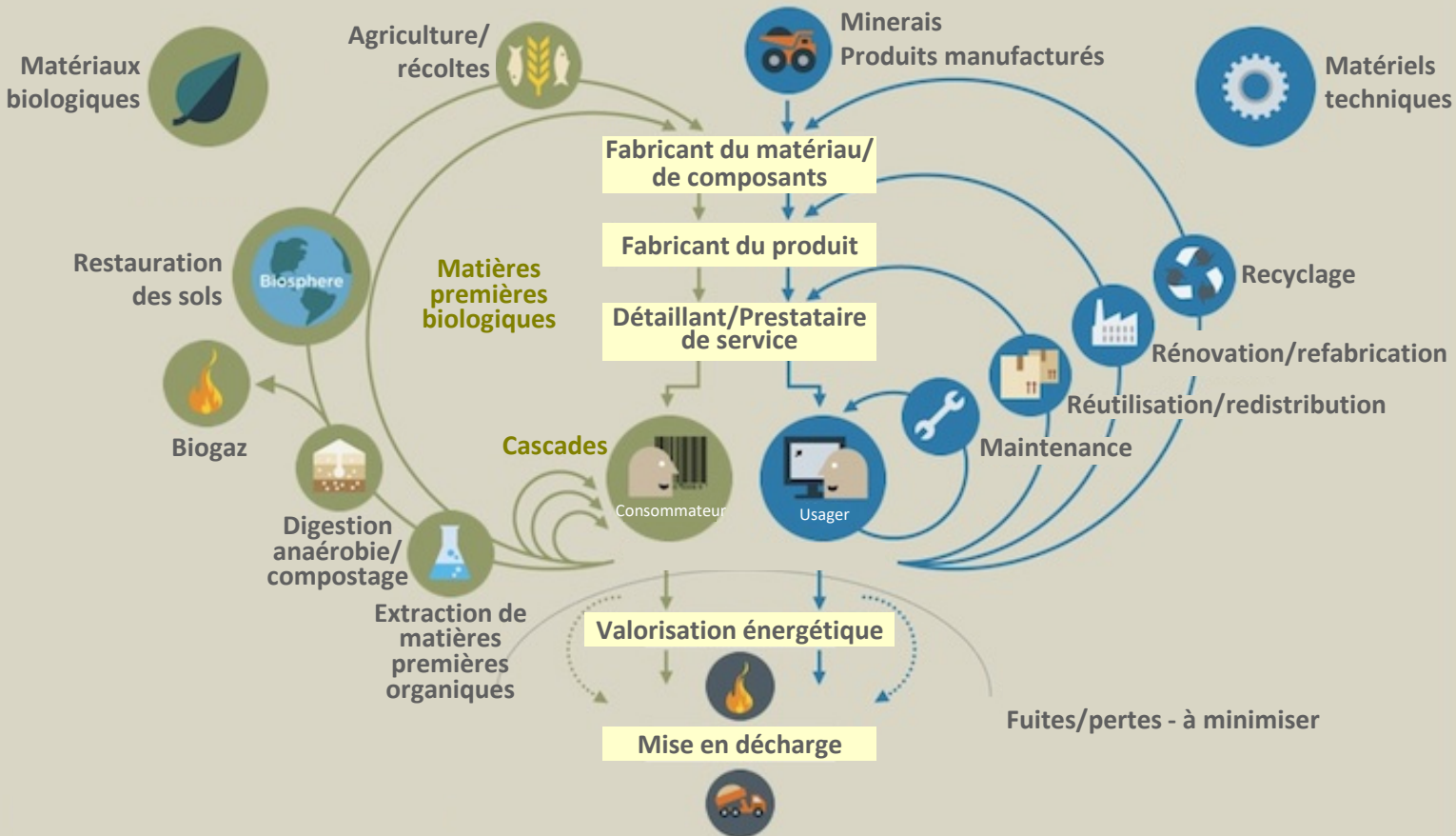
Les métaux peuvent être recyclés sans perte de qualité. Comme les liaisons métalliques sont restituées après fusion et solidification, les métaux retrouvent leurs performances originales, même après plusieurs boucles de recyclage. Ceci permet de les utiliser de manière répétitive pour les mêmes applications.

Les caractéristiques de performance de la plupart des matériaux non métalliques, à l'inverse, se dégradent après recyclage⁴⁵.

*dévalorisation ou décyclage (de l'anglais « downcycling »)

La dévalorisation est préférable à la mise en décharge mais on reste loin de l'économie circulaire^{46,47}

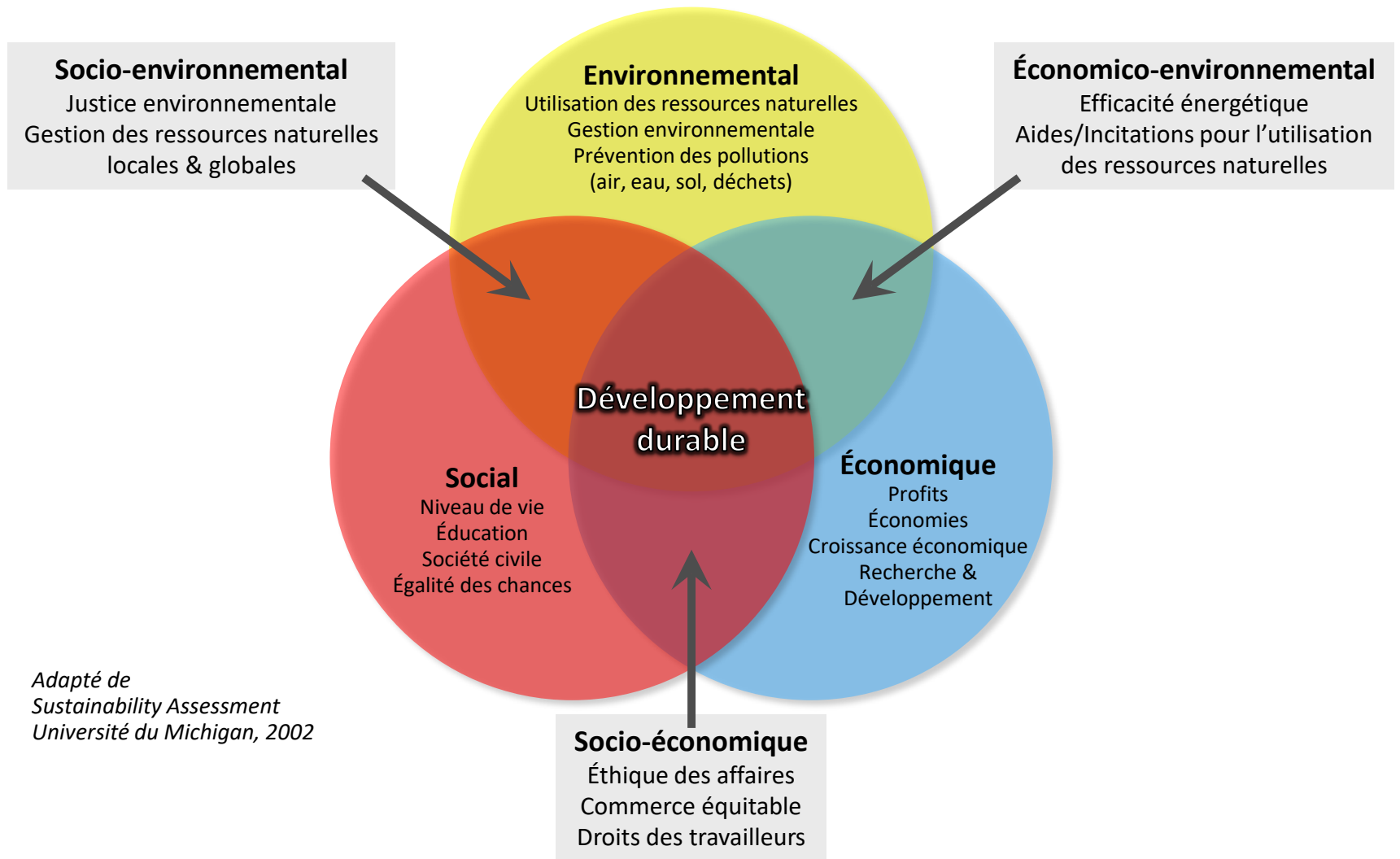
L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE, UN SYSTÈME INDUSTRIEL QUI SE RECONSTITUE PAR NATURE



Source : Ellen McArthur Foundation circular economy team

Collecter les déchets métalliques pour produire de nouveaux alliages est une des boucles de recyclage les plus courtes

L'économie circulaire vise à établir des boucles de ressources fermées, reproduisant les écosystèmes naturels, dans le fonctionnement de notre société et de notre économie.



Développement durable

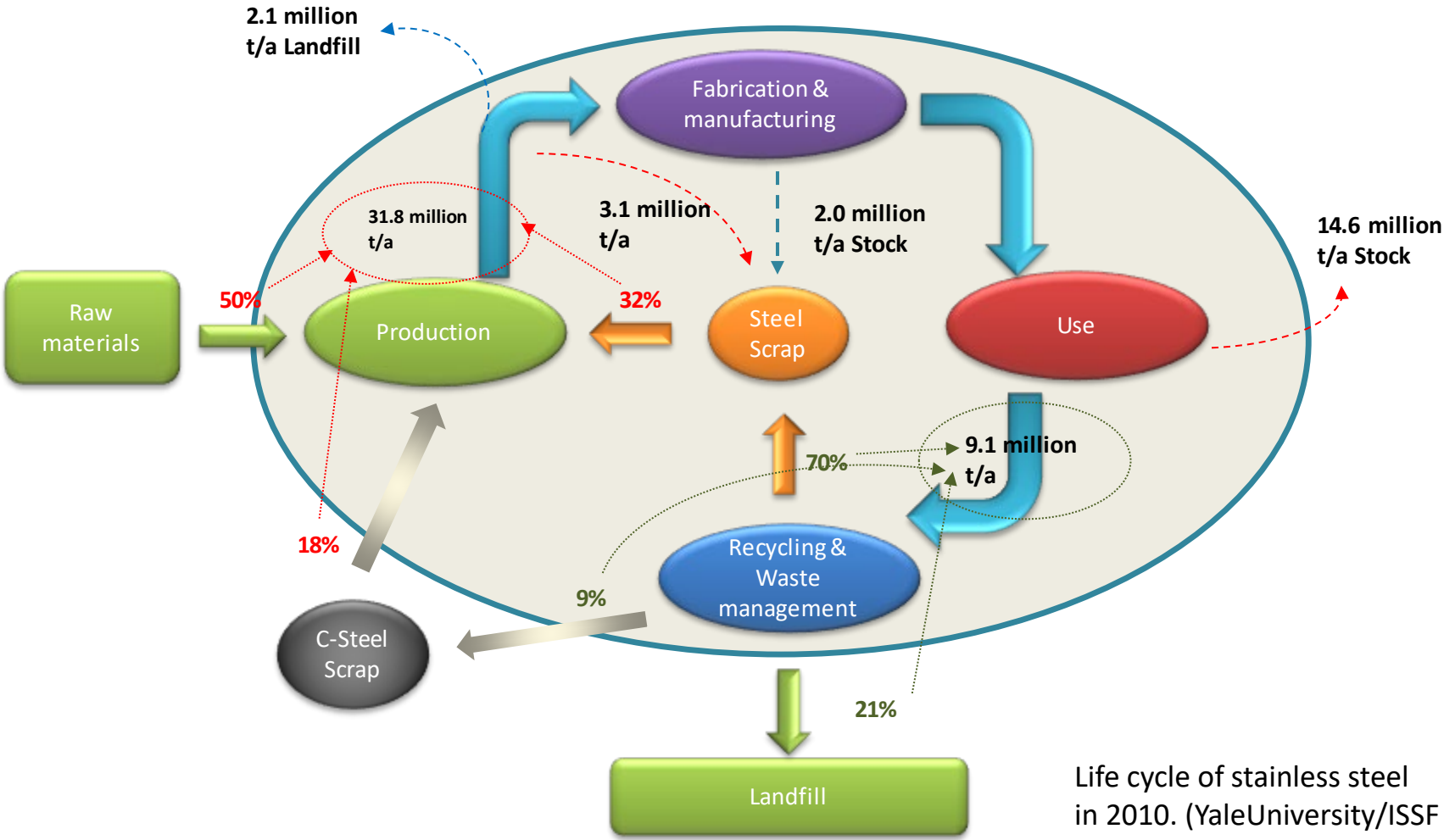
« Le développement durable concerne le cycle complet d'un produit de construction, de l'acquisition des matières premières jusqu'à sa destruction finale et la gestion des déchets en passant par sa conception, son calcul, sa fabrication et son utilisation. » (Rossi, B. 2012)⁹

Développement Durable et acier inoxydable :

1. Environnement
2. Social
3. Économique

1. Environnemental

Production ⇨ Utilisation ⇨ Recyclage ¹⁵

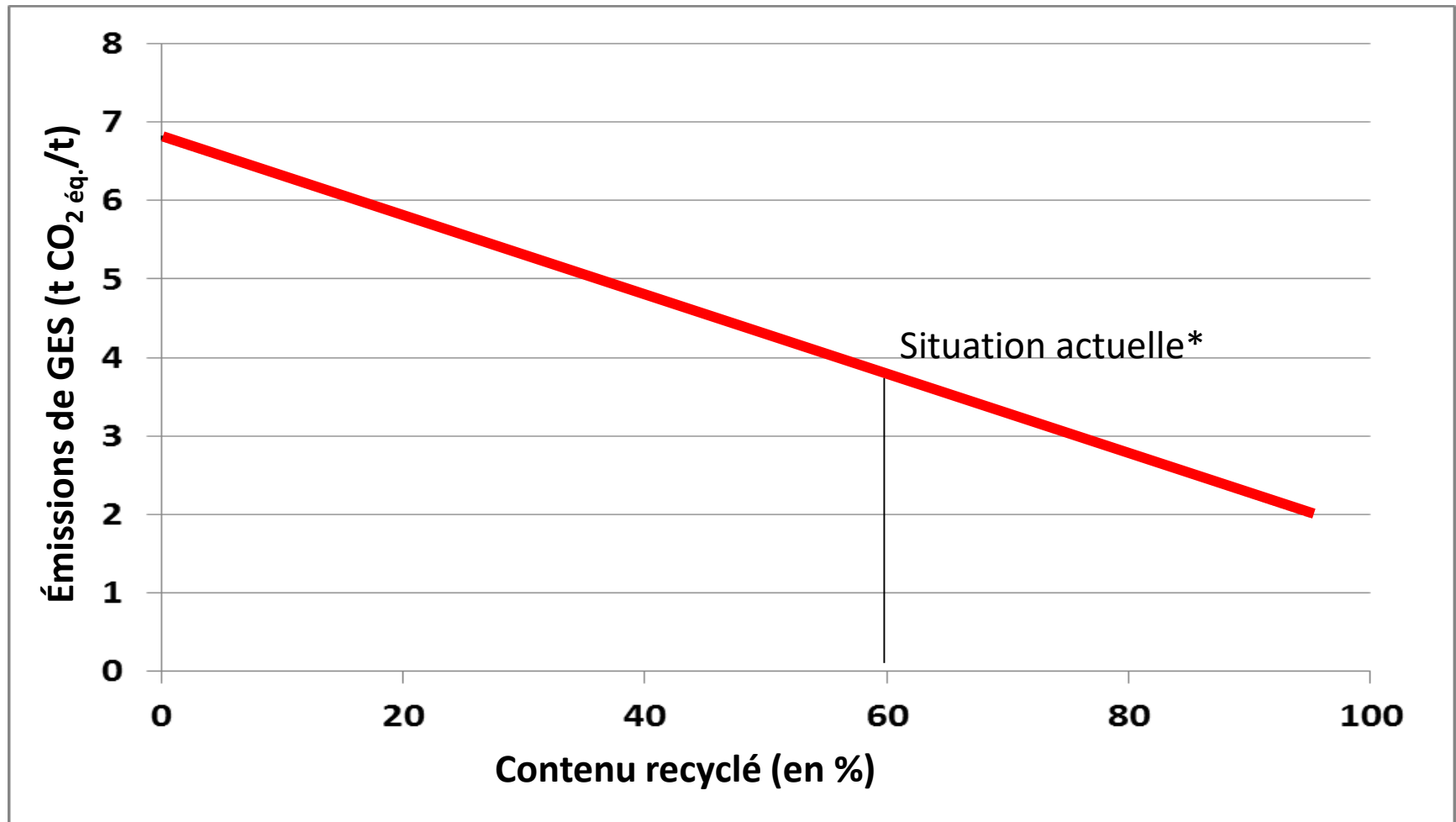


Life cycle of stainless steel in 2010. (YaleUniversity/ISSF stainless steel project 2013)

Compléments sur durée de vie et recyclage ^{15, 23-25}

Domaine d'utilisation	Durée de vie moyenne (années)	Vers décharge	Collecté pour recyclage		
			Total	Comme inox	Comme acier ordinaire
Bâtiment et infrastructure	50	8%	92%	95%	5%
Mobilité (automobiles)	14	13%	87%	85%	15%
Mobilité (autres)	30				
Machines	15	8%	92%	95%	5%
Electromenager et électronique	15	30%	70%	95%	5%
Produits métalliques	15	40%	60%	90%	20%

Émissions de GES vs Contenu Recyclé^{11,12,13,14}

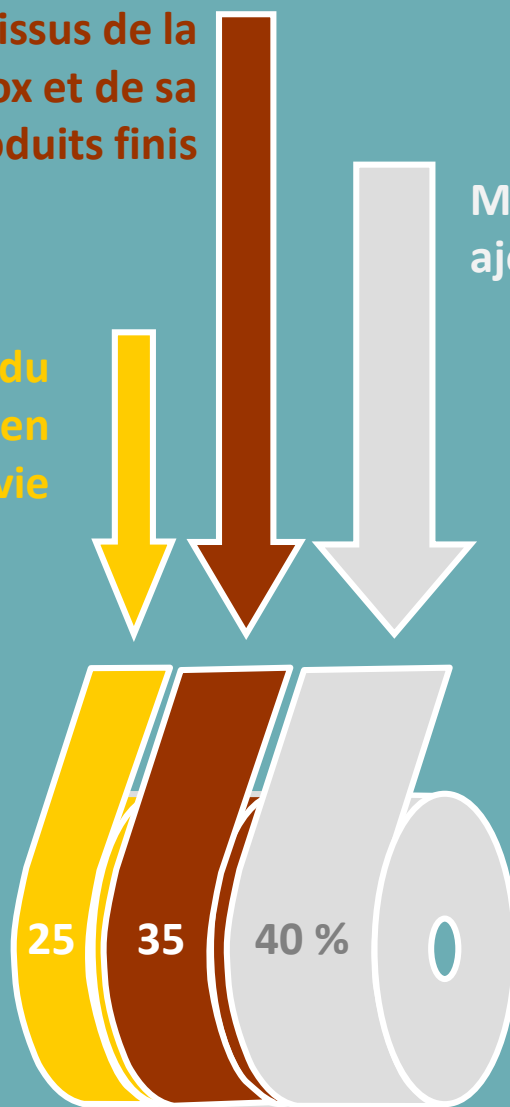


*Le pourcentage de contenu recyclé est limité par la quantité de ferrailles inox disponibles

Matériaux recyclés issus de la production d'inox et de sa transformation en produits finis

Matériaux issus du recyclage de produits en fin de vie

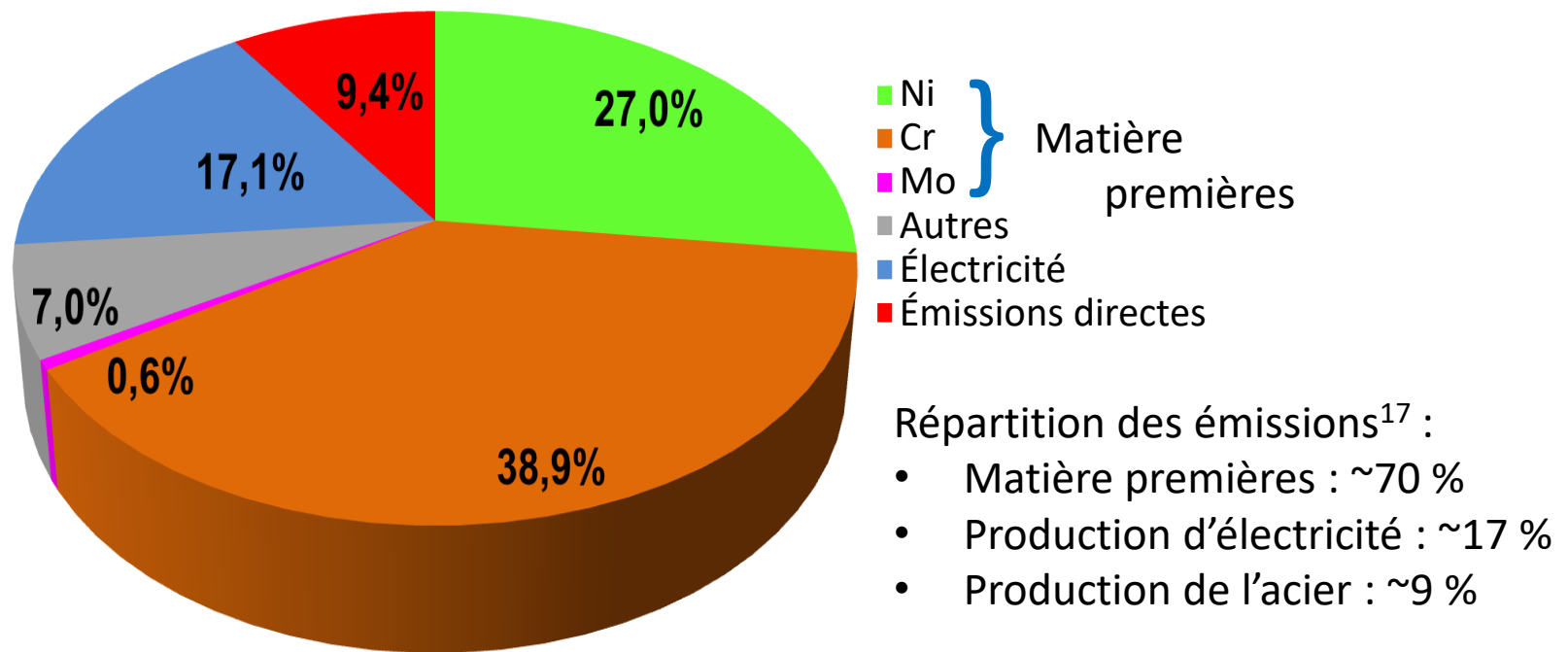
Matières premières ajoutées en complément



Contenu recyclé de l'acier inoxydable

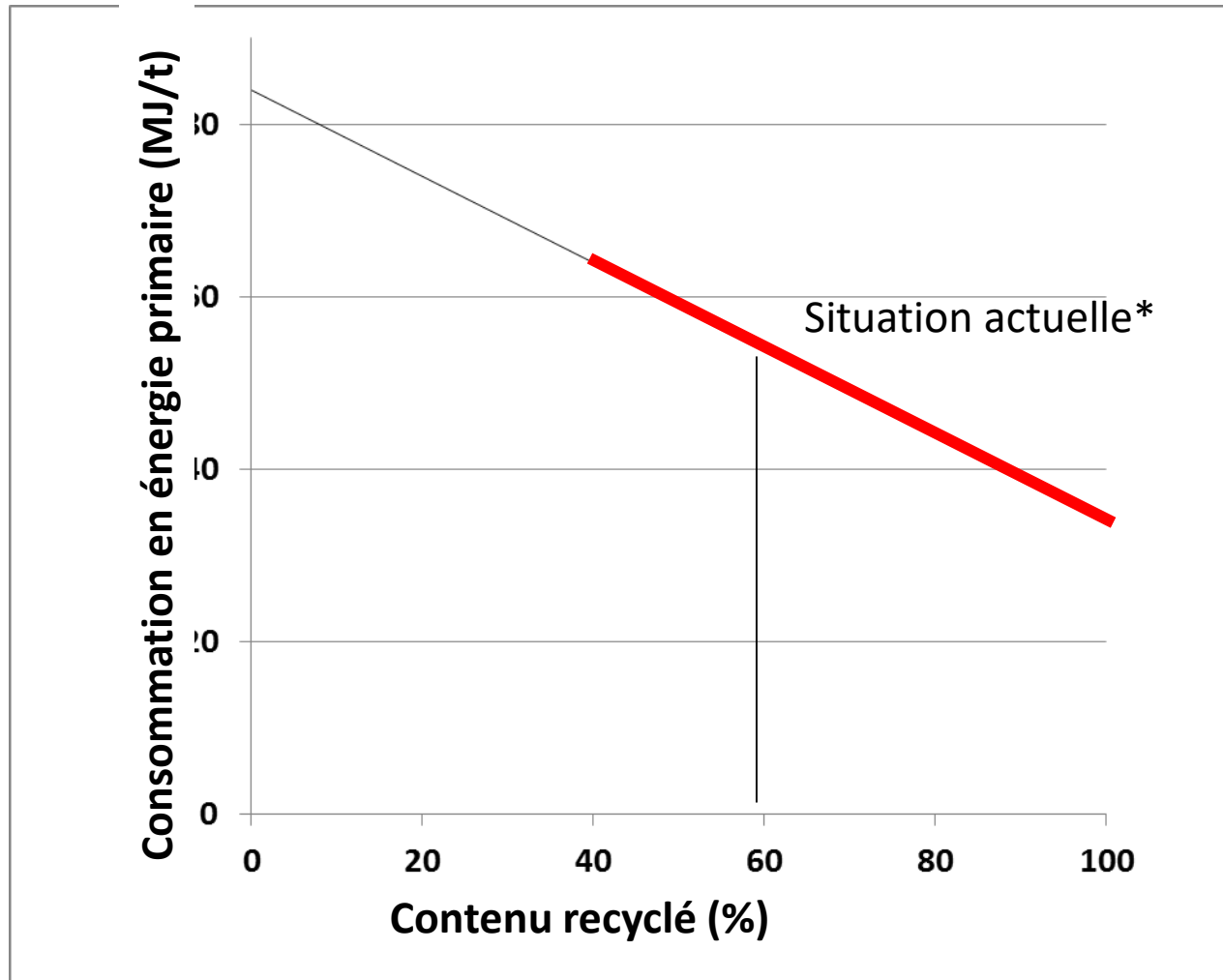
Émission de gaz à effet de serre (GES) pour l'acier inoxydable¹⁵

3,81 tonnes de CO₂ équivalent/1 tonne d'acier inoxydable¹⁶



Note : Ceci ne prend pas en compte le nickel issu de la filière fonte au nickel (Nickel Pig Iron) pour laquelle l'émission de GES pour le nickel est estimée au triple de la valeur utilisée ici. La Chine est actuellement le seul pays à utiliser cette filière

Consommation en énergie primaire¹⁸



* Le pourcentage de contenu recyclé est limité par la quantité de ferrailles inox disponibles

Impacts environnementaux pour la production, de l'extraction des matières premières à la sortie d'usine¹⁹

Métaux	Procédé de fabrication	GER (MJ/kg)	PRG (kg CO ₂ éq/kg)	PA (kg SO ₂ éq/kg)	FRS (kg/kg)
Acier inoxydable	Four électrique et AOD (décarburation argon-oxygène)	75	6,8	0,051	6,4
Acier	Filière intégrée (haut-fourneau et convertisseur à oxygène)	23	2,3	0,020	2,4
Aluminium	Procédé Bayer, Electrolyse Hall-Heroult	361	35,7	0,230	16,9
Cuivre	Pyrométallurgie/conversion et électro-raffinage	33	3,3	0,040	64
	Lixiviation en tas puis électro-récupération ou extraction par solvant	64	6,2	-	125

GER : Consommation Brute en Énergie (*Gross Energy Requirement*)

PRG : Potentiel de Réchauffement Global

PA : Potentiel d'Acidification

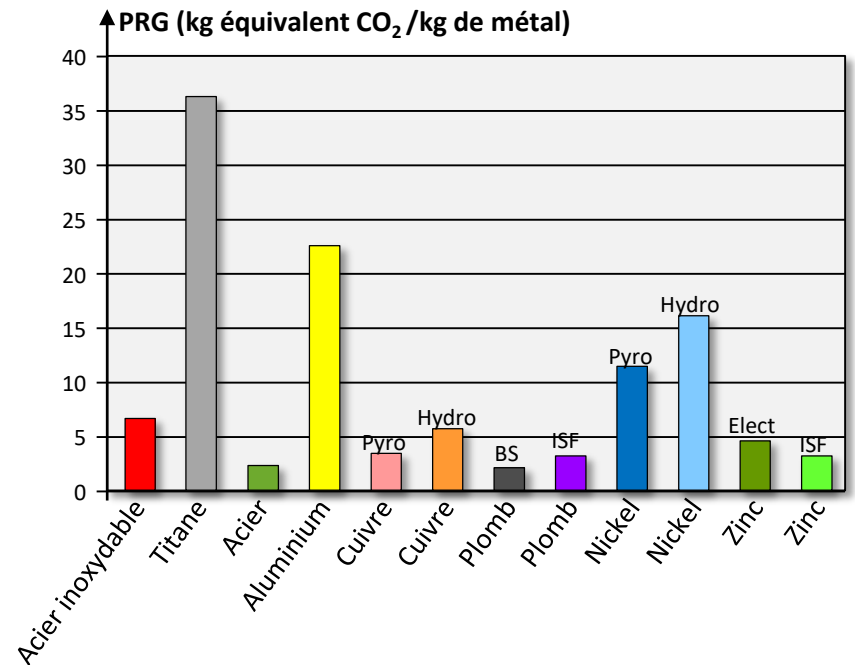
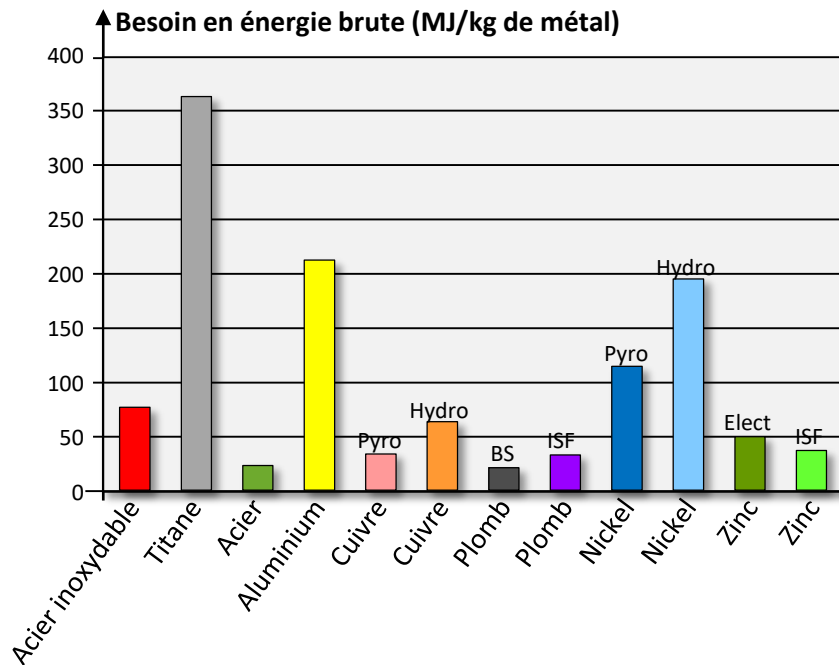
FRS : Fardeau de Résidus Solides

Impacts environnementaux pour la production des métaux, de l'extraction des matières premières à la sortie d'usine²⁰

Consommation en énergie brute pour la production de divers métaux, des matières premières à la sortie de l'usine

Potentiel de Réchauffement Global (PRG) pour la production de divers métaux, des matières premières à la sortie de l'usine

(sans aucun contenu recyclé)



On n'utilise pas les mêmes quantités de matériaux pour remplir une même fonction ou une même utilisation²¹

Exemple :

Impacts environnementaux potentiels indicatifs pour 3 revêtements de parois

Matériau	Consommation en énergie primaire (MJ/m ²)	PRG (kg CO ₂ -éq./m ²)	Scénario de fin de vie
Stratifié haute pression comme le Trespa®	759,3	23,9	50% réutilisation + 50% en décharge
Plâtre de base	144,2	12,7	Non recyclé
Acier inoxydable 0,5 mm	140,5	7,2	RR = 95%
Acier inoxydable 0,8 mm	191,7	11,3	RR = 95%

RR : Recyclage-réutilisation

Efficacité des matériaux



Réduire :

la quantité de matières premières pour produire l'acier inoxydable (40 %), afin de diminuer les émissions de CO₂.

Réutiliser :

La durabilité des aciers inoxydables rend sa réutilisation particulièrement importante.

Exemples : bouteilles, gobelets, tasses, pailles...

L'usage unique de plastiques devient progressivement interdit





Exemple de réutilisation!²²

Après 50 ans d'utilisation, ces panneaux en acier inoxydable étaient sales et rayés. A l'occasion de la rénovation du hall, les vieux panneaux ont été démontés, nettoyés, polis à nouveau puis réutilisés.

Efficacité des matériaux



Recycler :

L'acier inoxydable est recyclable à 100 % et toutes les ferrailles inox collectées (82 %) sont réutilisées.

Produire de l'acier inoxydable à zéro-déchet ⇒ Les laitiers et les poussières sont les principaux résidus et sous-produits de la fabrication de l'acier mais ils sont recyclables. A titre d'exemple, les laitiers peuvent être utilisés dans les enrobés routiers.

LEED* et données ICV pour l'acier inoxydable

- **L'U.S. Green Building Council** a publié la version 4 du LEED* en 2013
 - La nouvelle version contient des modifications favorables à l'acier inoxydable :
 - l'importance de la durée de vie est accrue
 - exigences plus strictes sur les émissions de COV** (ceci pose problème à quelques matériaux tels que les plastiques)
- **L'U.S. General Services Administration** (qui gère les bâtiments et les propriétés du gouvernement US) a récemment approuvé l'utilisation du LEED*
 - Le fédéral et les états exigent de plus en plus le LEED ou des certifications similaires pour les bâtiments neufs ou modifiés

*LEED : « Leadership in Energy and Environment Design ».

**COV : Composants Organiques Volatiles. Pour l'acier inoxydable, très faibles émissions lors de la production et de la fabrication (pas encore de données disponibles) et aucune pendant l'utilisation

Statut « LEED* Or »



Bâtiment durable avec acier inoxydable : le centre de congrès David L. Lawrence à Pittsburgh (2003)²⁶

Toiture :

- Acier inoxydable de nuance S30400
- Dimensions : 280 × 96 m
- Enveloppe de 23 000 m² , épaisseur 0,6 mm, poids environ 136 tonnes

Bâtiment durable avec l'acier inoxydable : le statut « LEED* Or »



Le statut « **LEED Or** » récompense :

- Le redéveloppement de friches industrielles
- Les solutions de transports alternatifs
- La réduction de l'utilisation de l'eau
- L'efficacité énergétique
- L'utilisation de matériaux n'émettant pas ou peu de produits toxiques
- Les conceptions innovantes

*LEED : *Leadership in Energy and Environment Design.*

Développement durable en Génie Civil avec l'inox : La jetée Progreso ²⁷



A Progreso (Mexique), une jetée a été construite en 1970.

L'environnement marin a entraîné la corrosion des armatures en acier au carbone et la structure s'est effondrée.

Développement durable en Génie Civil avec l'inox : La jetée Progreso



La jetée voisine a été construite entre 1937 et 1941 en utilisant des ronds à béton en acier inoxydable.

Développement durable en Génie Civil avec l'inox : La jetée Progreso



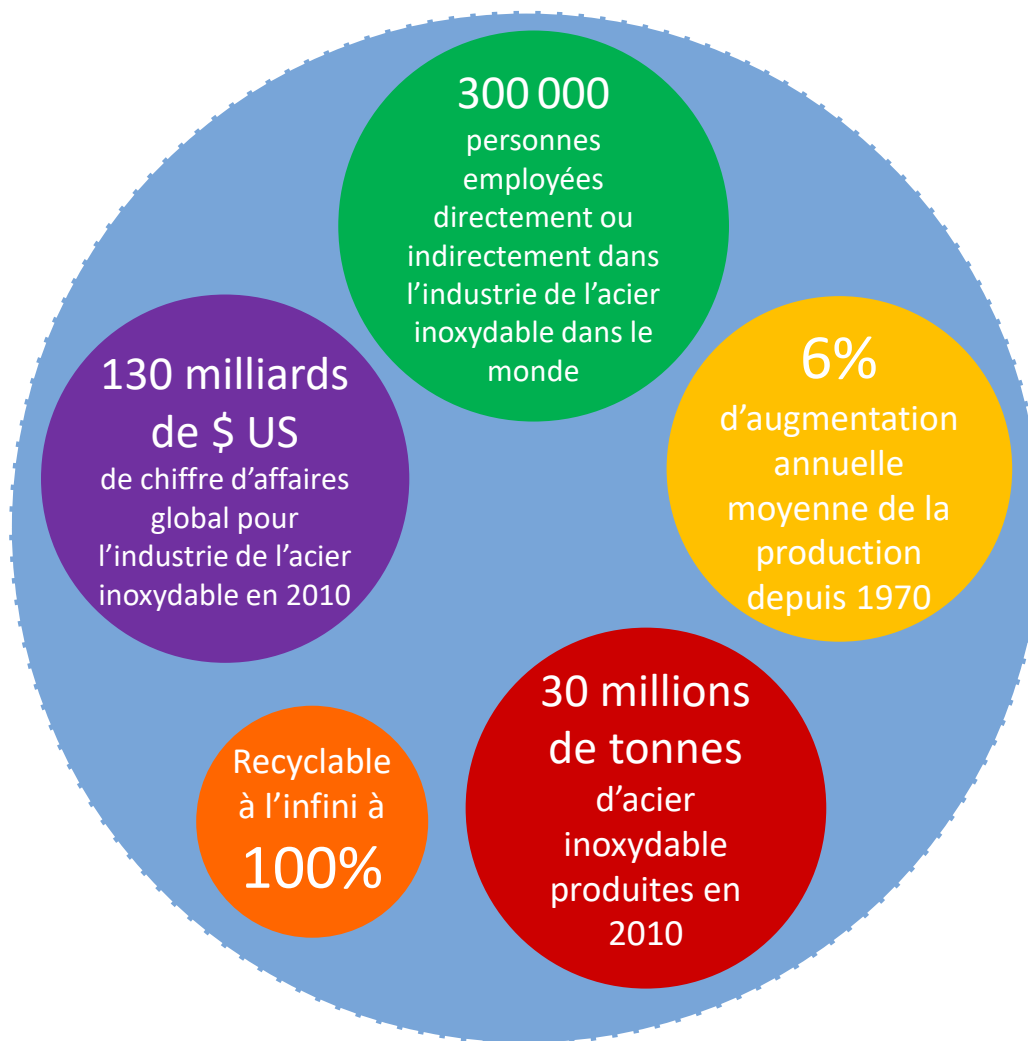
Depuis sa construction, elle n'a nécessité aucun d'entretien et est restée comme neuve.

2. Social

Un matériau de développement durable est sans danger pour les personnes qui le produisent, l'utilisent et le recyclent.

- L'acier inoxydable est sans danger lors de sa production, et de son utilisation. Pour ces raisons, c'est le matériau de prédilection pour les applications médicales, alimentaires, ménagères et équipement de restauration.
- La sécurité et la santé des employés sur les lieux de travail sont prioritaires dans l'industrie des aciers inoxydables.
- L'acier inoxydable améliore aussi la qualité de vie en rendant les progrès techniques possibles. Par exemple, les installations qui nous fournissent l'eau potable, la nourriture et les soins, ne seraient pas aussi hygiéniques et efficaces sans acier inoxydable.

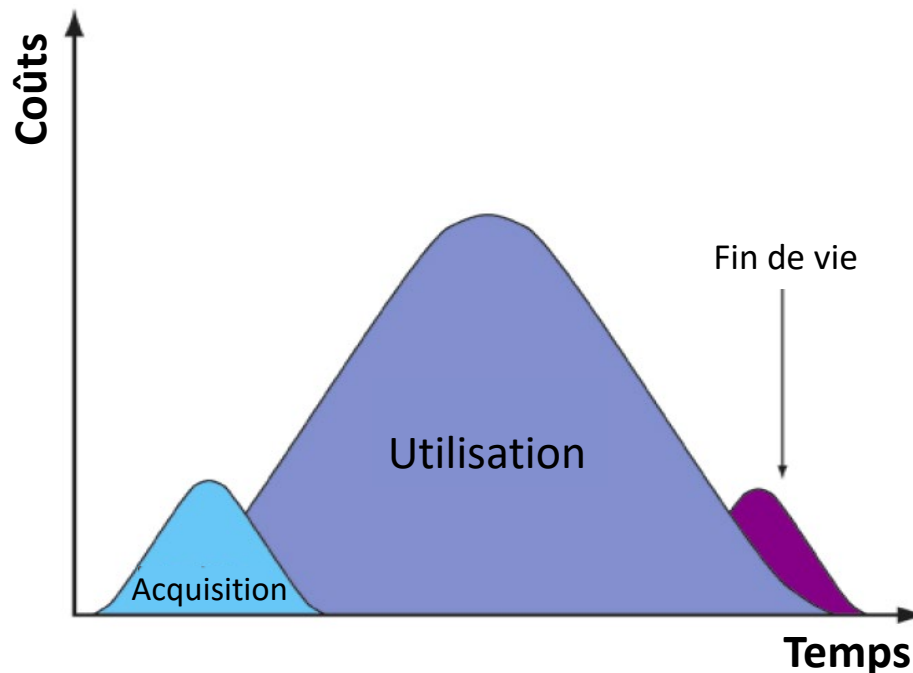
3. Données économiques



Coût Global de Possession (CGP)³⁰

- Le CGP prend en compte les coûts d'un bien tout au long de son cycle de vie, lorsqu'il remplit ses exigences de performance (ISO 15686-5).
- Pour un produit, le CGP est la somme de tous les coûts subis pendant le cycle de vie :

Conception ⇒ Fabrication ⇒ Utilisation ⇒ Fin de vie



Source : Méthodologie du coût du cycle de vie. Commission Européenne

Coût Global de Possession (CGP)

Le calcul du CGP permet d'aider à choisir le meilleur investissement ou à comparer différentes options.

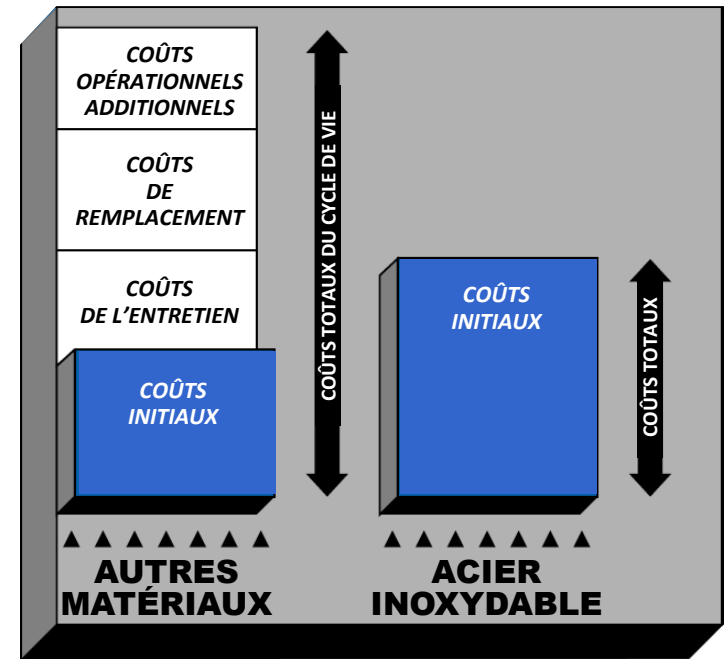
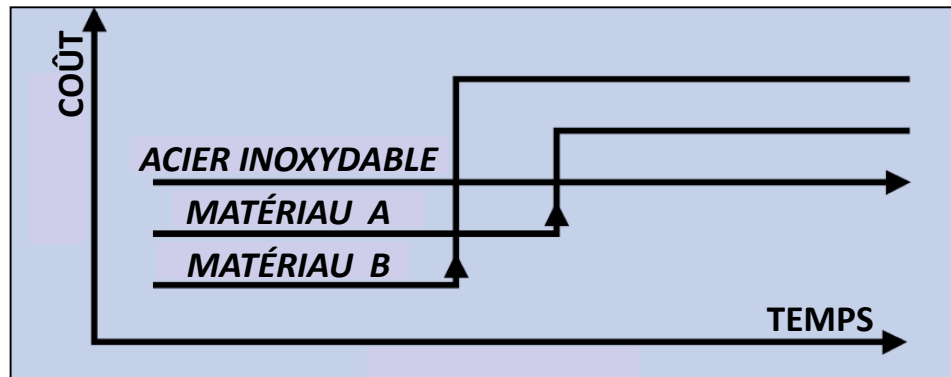
Tous les coûts sont à la valeur actuelle avant l'addition :

Coût Global de Possession (CGP)	Coûts initiaux d'acquisition des matériels (AC)	Coût d'installation et de fabrication des matériels (IC)	Coûts des opérations de maintenance (OC)	Coûts des pertes de production lors des temps d'arrêt (LP)	Coût de remplacement des matériels (RC)
CGP	AC	IC	$+$ $\sum_{n=1}^N \frac{OC}{(1+i)^n}$	$+$ $\sum_{n=1}^N \frac{LP}{(1+i)^n}$	$+$ $\sum_{n=1}^N \frac{RC}{(1+i)^n}$

où : N = Durée de vie désirée i = Taux d'intérêt réel n = Année de l'événement

L'acier inoxydable n'est pas cher si l'on prend en compte le Coût Global de Possession vie³¹

Le coût des réalisations utilisant d'autres matériaux augmente notablement dans le temps alors que celles en acier inoxydable demeurent généralement constant

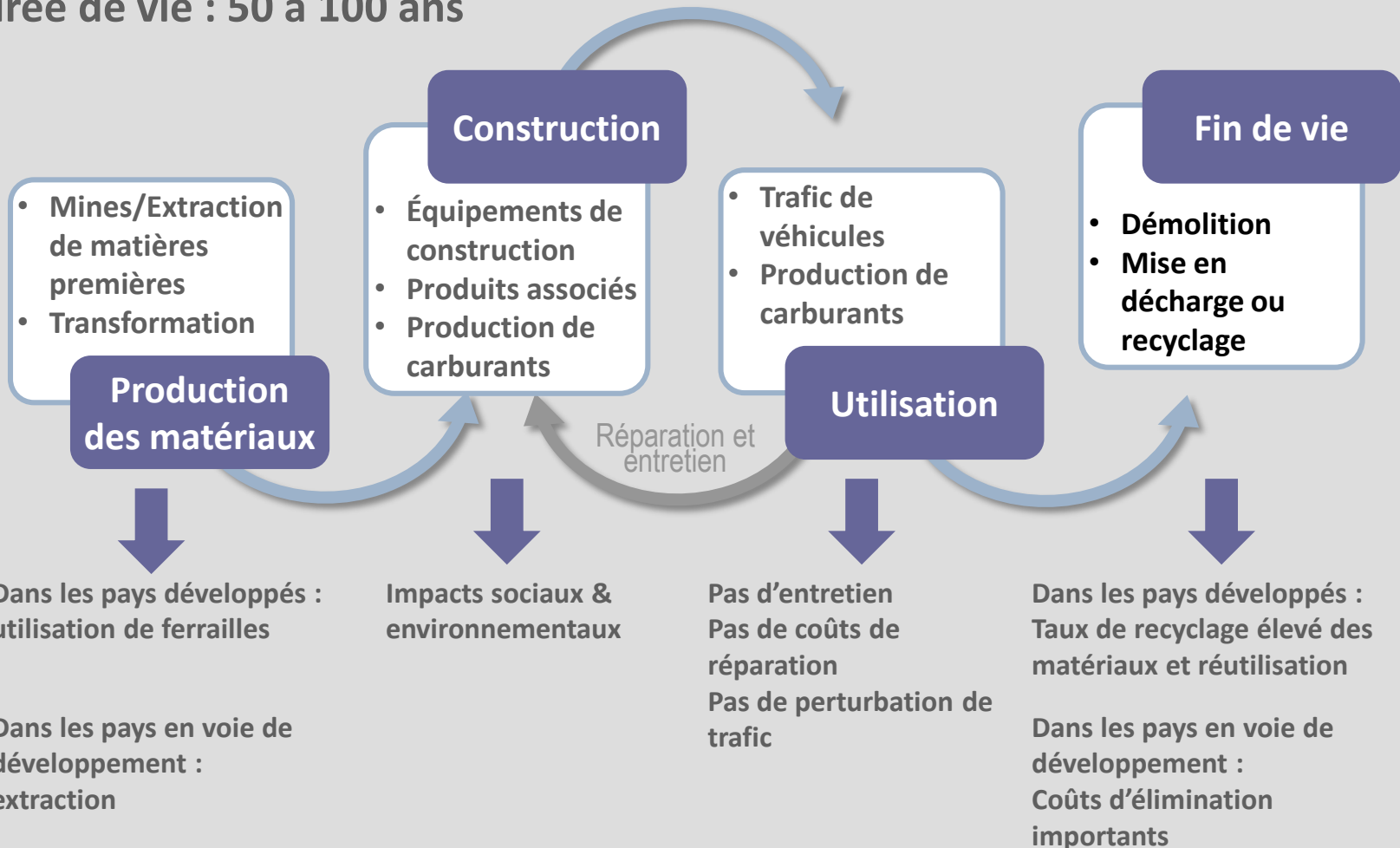


« La corrosion des métaux coûte à l'économie américaine plus de 300 milliards de \$ par an. On estime qu'environ un tiers de ce coût (100 milliards de \$) serait évité si l'on utilisait une technologie mieux adaptée. Cela commence dès la phase de conception par le choix d'un matériau anticorrosion comme l'acier inoxydable, et en quantifiant les coûts initiaux et futurs, incluant l'entretien, avec les techniques d'analyse du coût du cycle de vie (ACV +CGP). »

Exemple de CGP : Ponts

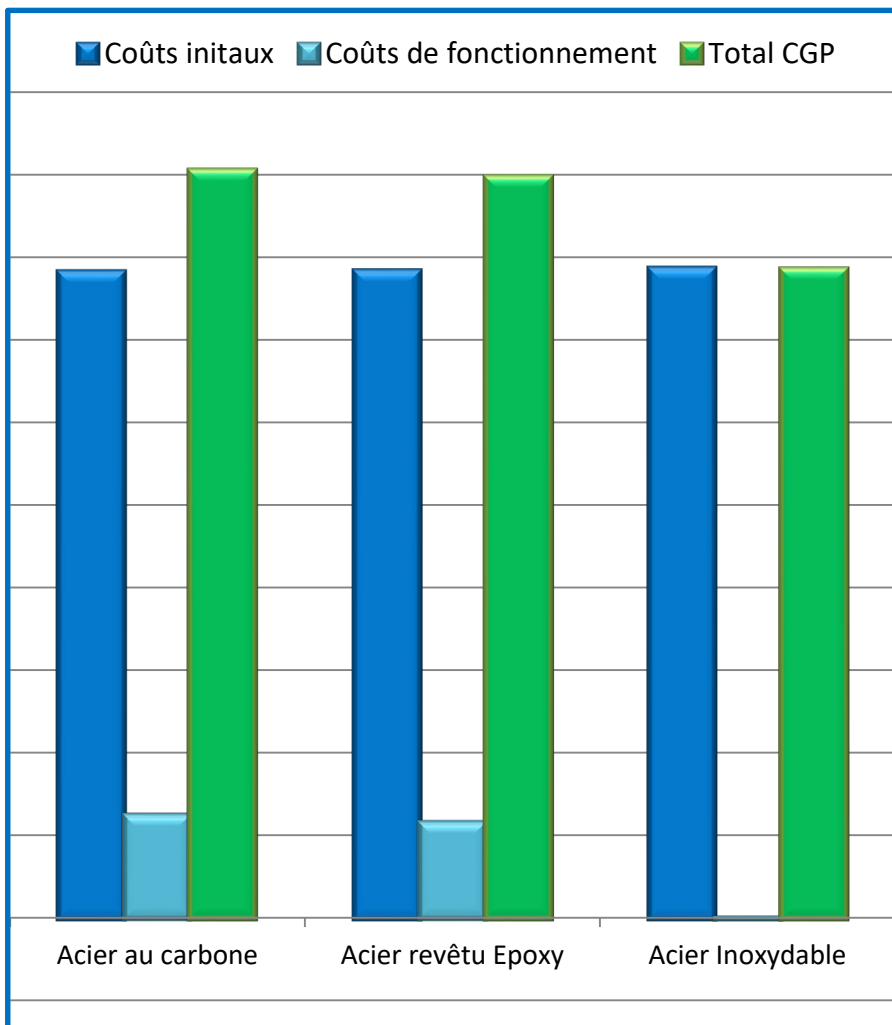
Exemple de phases de cycle de vie d'un pont en acier inoxydable et leurs impacts sur l'environnement dans différentes parties du monde

Durée de vie : 50 à 100 ans



Exemple de CGP : Ponts

Bilan du coût du cycle de vie d'un pont autoroutier en béton armé³²



Description	Armatures en acier au carbone	Armatures en acier revêtu époxy	Armatures en acier inoxydable
Coût des matières premières	8 197	31 420	88 646
Coûts de fabrication	0	0	0
Autres coûts de construction	15 611 354	15 611 354	15 611 354
Coûts initiaux	15 195 551	15 642 74	15 700 000
Entretien	0	0	0
Remplacement	256 239	76 872	-141
Perte d'exploitation	2 218 524	2 218 524	0
Matériaux autres	0	0	0
Coûts de fonctionnement	2 247 763	2 295 396	-141
Total Coût de Possession	18 094 314	17 937 170	15 699 859

Exemple de CGP : Toiture

Coût de Possession d'une toiture^{33,34,35}



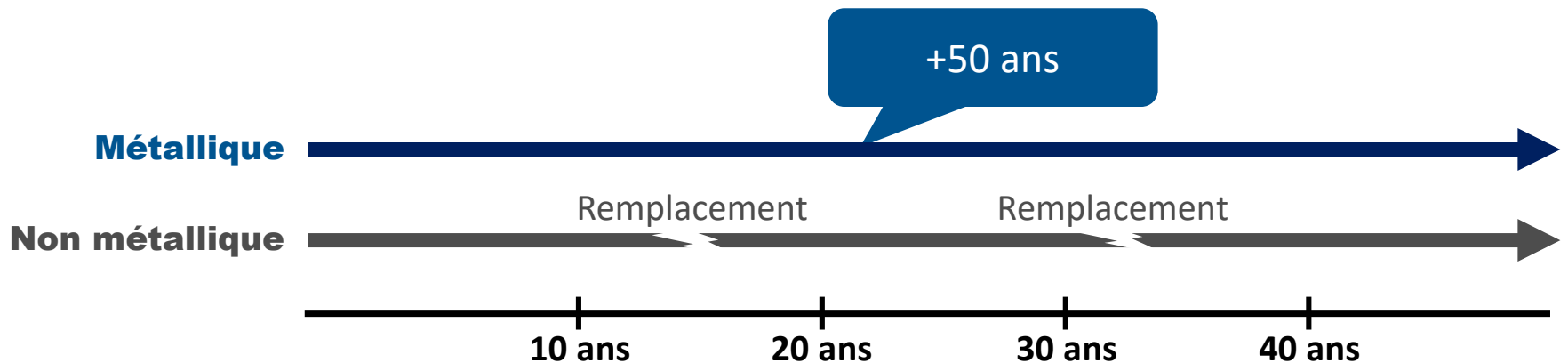
Systèmes de toitures conventionnelles, ≈30 ans



Systèmes de toitures métalliques, 40 à 50 ans



Systèmes de toitures en acier inoxydable, plus de 50 ans

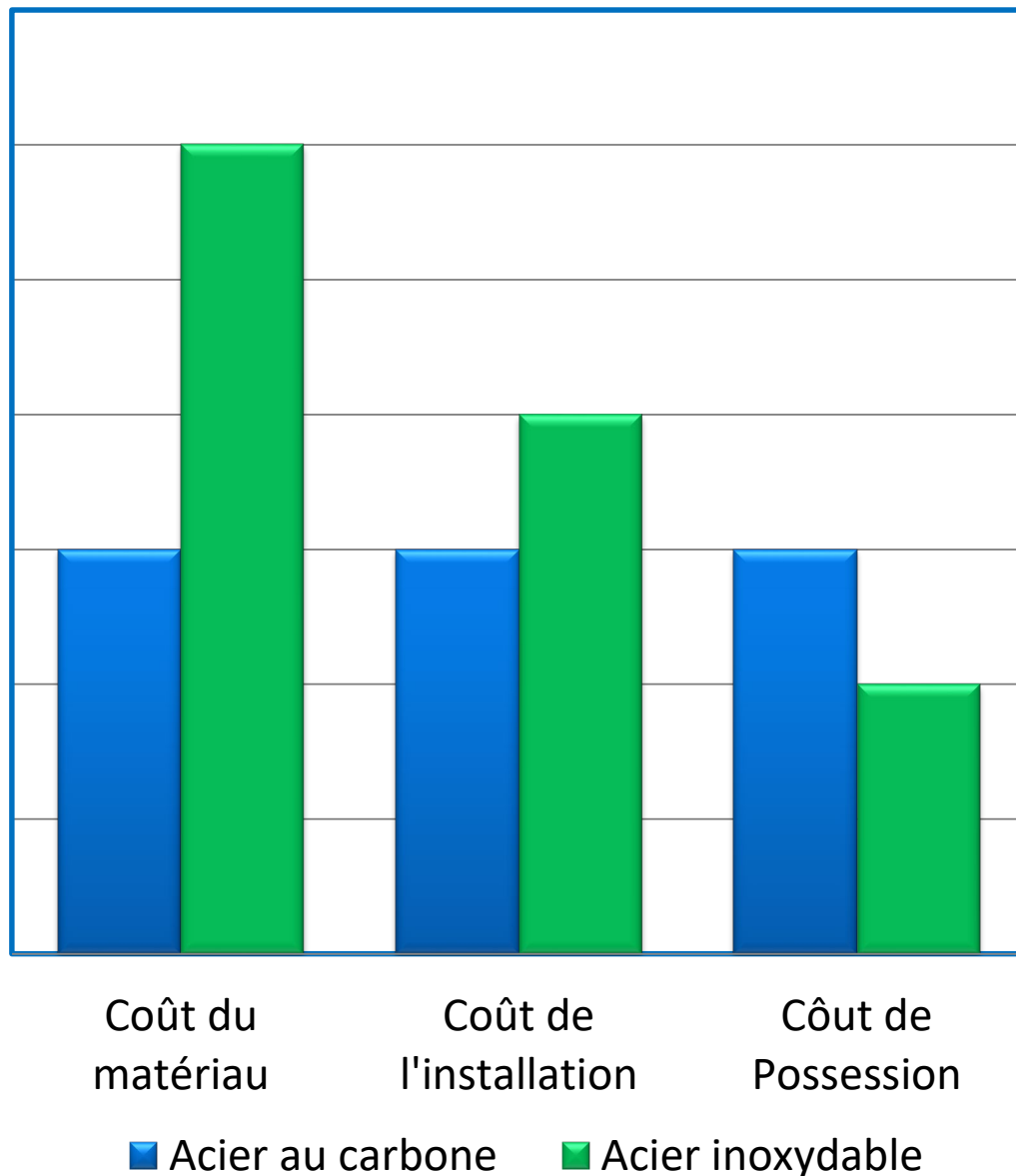


Exemple de CGP : Toiture

Comparaison du coût d'un acier au carbone galvanisé de 0,6 mm avec celui d'un acier inoxydable de 0,4 mm en nuance 1.4401 :

Du fait des caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable, l'épaisseur du matériau peut être réduite à 0,5 voire même 0,4 mm, conduisant ainsi à un poids plus faible (4,68 kg/m² pour l'acier au carbone galvanisé de 0,7 mm d'épaisseur et 3,12 kg/m² pour l'acier inoxydable de 0,4 mm).

Alors que l'acier au carbone a une durée de vie de 15 à 20 ans, celle de l'acier inoxydable correspond généralement à celle du bâtiment.



L'architecture en acier inoxydable est intemporelle⁴³



Hôtel Savoy, Londres, 1929



Empire State building, New York, 1931



Chrysler Building, New York, 1930



Passerelle Helix, Singapour, 2011







Tours Petronas, Kuala Lumpur, 1998



La « porte des nuages », surnommée le « Jelly Bean », Chicago, 2008

Comparaison des coûts du cycle de vie^{36,37,38,39,40}

Structures	Terminé en	Matériau	Hauteur	Entretien
<p>Tour Eiffel Paris</p> 	<p>1889</p> 	<p>Fer puddlé</p>	<p>324 m</p>	<p>Tous les 7 ans. Chaque campagne de peinture dure environ 1 an et demi (15 mois). Elle demande 50 à 60 tonnes de peinture, 25 peintres, 1500 pinceaux, 5000 disques de meulage et 1500 tenues de travail.</p>
<p>Chrysler Building (toiture et entrée)</p> 	<p>1930 (toiture en 1929)</p> 	<p>Acier inoxydable austénitique (nuance 302)</p>	<p>319 m</p>	<p>Deux fois en 1951 puis en 1961 et en 1995. La solution de nettoyage de 1961 est inconnue. Un détergent peu agressif, dégraissant et abrasif, a été utilisé en 1995.</p>

Qu'est-ce qui fait que l'acier inoxydable est un matériau « Vert » ?

Évaluation environnementale de l'acier inoxydable⁴¹

Quelle est la teneur en matériaux recyclés ?	60 %
Est-il recyclable à 100 % ?	Oui
Offre-t-il une durée de vie importante ?	Oui (il réduit la fréquence d'entretien et de démolition)
Contient-il une part recyclable ?	Oui (à la fois post-consommation et post-fabrication)
Est-ce que les déchets de construction peuvent éviter l'enfouissement ?	Oui (valeur élevée de la ferraille inox et réutilisation)
Peut-il être récupéré et réutilisé lors d'une rénovation ?	Oui
Est-ce un matériau à faible émission ?	Oui (pas de revêtement = zéro émission)
Peut-il améliorer la qualité de l'air intérieur ?	Oui (aucun composé organique volatil, ne facilite pas le développement bactérien, conduites résistantes à la corrosion)
Permet-il d'éviter l'usage de matériaux toxiques ?	Oui (barrières anti-termite de longue durée, relargage de toiture minimal)
Peut-il aider à économiser l'énergie ?	Oui (brise-soleil, toitures, inserts de balcons)
Peut-il aider à générer de l'énergie propre ?	Oui (supports de panneaux solaires, filtration des gaz de centrales thermiques....)
Peut-il aider à conserver l'eau ?	Oui (conduites d'eau et réservoirs résistant à la corrosion et aux séismes, donc sans pertes)
Est-ce que les panneaux réfléchissants ajoutent de la luminosité naturelle ?	Oui
Peut-il allonger la vie d'autres matériaux ?	Oui (ancrages de pierre et de maçonnerie, fixations pour le bois et des métaux comme Al et les métaux à longue durée de vie...)

CONCLUSIONS

- Le développement durable constitue un important défi pour le futur de l'acier inoxydable. Des efforts ont été réalisés pour réduire son empreinte carbone en augmentant la recyclabilité et en améliorant les procédés.
- L'acier inoxydable possède un ensemble de propriétés qui devraient être prises en compte dans les décisions de choix des matériaux en phase conception :
 - Caractéristiques mécaniques
 - Propriétés de résistance à la corrosion
 - Résistance au feu
 - Recyclabilité
 - Longue durée de vie
 - Faibles coûts de maintenance
 - Neutre et hygiénique
 - Esthétique
 - Neutre pour l'eau de pluie

Références et sources (1/3)

1. <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:a5cd469c-89cb-4d57-9ad8-13a0d86d65f0/Sustainability+indicator+definitions+and+relevance.pdf>
2. <http://ghginstitute.org/2010/06/28/what-is-a-global-warming-potential/>
3. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>
4. <https://www.gsa.gov/portal/content/101197>
5. Recycled content is defined in accordance with the ISO Standard 14021 -Environmental labels and declarations - Self declared environmental claims (Type II environmental labeling).
6. <http://www.greenspec.co.uk/building-design/recycled-content/>
7. <http://www.fao.org/docrep/u2246e/u2246e02.htm>
8. B. Rossi. Stainless steel in structures: Fourth International Structural Stainless Steel Experts Seminar. Ascot, UK. 6-7 December 2012.
9. Source: Yale University/ISSF Stainless Steel Project, 2013
10. B. Rossi. ArcelorMittal International Scientific Network in Steel Construction Sustainability Workshop and Third Plenary Meeting, Bruxelles, 2010.
11. B. Rossi. Stainless steel in structures: Fourth International Structural Stainless Steel Experts Seminar. Ascot, UK. 6-7 December 2012.
13. T.E. Norgate, S. Jahanshahi, W.J. Rankin. Assessing the environmental impact of metal production processes. Journal of Cleaner Production 15 (2007), 838-848.
14. <http://www.worldstainless.org/Files/issf/Animations/Recycling/flash.html>

Références et sources (2/3)

15. ISSF https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_and_CO2.pdf. Data from European and Japanese ISSF members
16. Based on 2013 data, including 60% scrap content (and therefore 40% new materials) and energy contribution to GHG
17. Data provided by ISSF, estimates calculated by SCM. Includes 60% recycled content
18. ISSF www.worldstainless.org. Data from European and Japanese ISSF members
19. T.E. Norgate, S. Jahanshahi, W.J. Rankin. Assessing the environmental impact of metal production processes. Journal of Cleaner Production 15 (2007), 838-848.
20. T.E. Norgate, S. Jahanshahi, W.J. Rankin. Assessing the environmental impact of metal production processes. Journal of Cleaner Production 15 (2007), 838-848.
21. B. Rossi. Stainless steel in structures: Fourth International Structural Stainless Steel Experts Seminar. Ascot, UK. 6-7 December 2012.
22. C. Houska. Sustainable Stainless Steel Architectural.
23. <http://www.worldstainless.org/Files/issf/Animations/Recycling/flash.html>
24. <https://www.drkarenslee.com/comparing-reusable-bottles-stainless-steel-glass-plastic/>
25. Yale University/ISSF Stainless Steel Project, 2013
26. The Greening of a Convention Centre. Nickel, Volume 23, Number 3, June 2008, 6-9.
27. <https://www.nickelinstitute.org/Sustainability/LifeCycleManagement/LifeCycleAssessments/LCAPProgress/Pier.aspx>
28. International Stainless Steel Forum www.worldstainless.org
29. World Steel Association
30. A. Dusart, H. El-Deeb, N. Jaouhari, D. Ka, L.Ruf . Final Report ISSF Workshop. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2011.

Références et sources (3/3)

31. http://www.ssina.com/download_a_file/lifecycle.pdf
32. https://www.nickelinstitute.org/nickel-magazine/nickel-magazine-vol-31-no1-2016/www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/RoofingTech_EN.pdf
33. <http://www.ametalsystems.com/RoofLifecycleCostComparison.aspx>
34. <http://www.metalroofing.com/v2/content/guide/costs/life-cycle-costs.cfm>
35. <https://www.tou Eiffel.paris/en>
36. https://en.wikipedia.org/wiki/Eiffel_Tower
37. <http://corrosion-doctors.org/Landmarks/Eiffel.htm>
38. http://en.wikipedia.org/wiki/Chrysler_Building#
39. Nickel Development Institute. Timeless Stainless Architecture. Reference Book Series No 11 023, 2001
40. C. Houska. Sustainable Stainless Steel Architectural. Construction Canada, September 2008, 58-72.
41. Nickel Development Institute. Timeless Stainless Architecture. Reference Book Series No 11 023, 2001
42. G. Gedge. Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering. Journal of Constructional Steel Research 64 (2008), 1194–1198.
43. <http://www.metalsforbuildings.eu/>
44. <http://www.circle-economy.com/circular-economy/>
45. <http://www.irishenvironment.com/iepedia/circular-economy/>

Merci !

Annexe

Recyclage d'autres matériaux

Il s'agit d'une question complexe.

L'objectif ici est de donner quelques idées sur d'autres matériaux à des fins de comparaison.

Les sources correspondantes sont fournies

Compléments sur le recyclage : ciments et bétons

www.wbcserver.org/wbcserver/publications/cd_files/datas/business-solutions/cement/pdf/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf

- 20 % maximum du béton concassé peut être réutilisé dans de nouveaux bétons.
 - seulement en tant que granulats et pas pour le ciment qu'il contient
 - le béton ainsi produit est de qualité inférieure qui ne convient pas pour toutes les applications
- Il semble que la plupart des bétons issus de démolitions aille dans les soubassements de routes et en décharge (aucun chiffre précis n'est disponible)
- Le concassage et le transport des bétons de démolition sont les principales opérations de recyclage à comparer avec l'extraction locale des granulats .
- En général, le recyclage se traduit toujours par une dévalorisation (décyclage).
- Réutiliser du béton de démolition en moellons est seulement marginal aujourd'hui mais cela peut devenir le chemin le plus court pour réutiliser sans « dévalorisation ». Difficile toutefois à mettre en œuvre !

Compléments sur le recyclage : plastiques

<http://www-g.eng.cam.ac.uk/impee/?section=topics&topic=RecyclePlastics&page=materials>

- Les déchets internes (créés à la source de la production) sont pratiquement recyclés à 100 %
- Le recyclage des plastiques usagés est un gros problème :
 - La collecte prend du temps et elle est coûteuse
 - Trier des déchets de plastiques mélangés est difficile – la contamination est inévitable.
 - Enlever les étiquettes avec un taux de réussite de 100 % est presque impossible
 - Les contaminations de toutes sortes compromettent les réutilisations dans des applications « hi-tech »
 - ⇒ Le plastique recyclé (sauf dans l'usine de production) est réutilisé dans des applications de plus bas niveau (décyclage) : PETE* : tapis bon marché, moquettes... PE** et PP** : pots de fleurs, bancs de jardins publics...
 - ⇒ ou peut éventuellement être brûlé, pire enfoui ou pire encore se retrouver à flotter dans les océans.

*PET ou PETE : polytéréphtalate d'éthylène

**PE : polyéthylène

***PP : polypropylène

Compléments sur le recyclage : bois*

- La meilleure option de recyclage est bien sûr de réutiliser le bois. Il apparaît que de nombreux efforts sont faits pour collecter, reconditionner et réutiliser le bois et ses dérivés. Quelle quantité est réutilisée? C'est difficile de le savoir.
- Le bois non traité a trouvé un nombre croissant de nouveaux usages : produits agricoles et horticoles, litières pour animaux, surfaces de halles équestres...
- Le bois traité (les traitements chimiques destinés à le protéger contre la pourriture, les champignons, les insectes et les UV) contient des produits chimiques nocifs qui limitent fortement son usage. Sa plus grande réutilisation actuelle est la fabrication de panneaux de particules mais ce qu'il advient de ces panneaux en fin de vie n'est pas clair.
- Il doit être souligné que la déforestation globale allant en augmentant sur la planète, on ne parle plus de ressources illimitées pour le bois, particulièrement dans les pays du Nord où il faut un siècle pour qu'un arbre arrive à maturité.

<https://dtsc.ca.gov/toxics-in-products/treated-wood-waste/>

<https://woodrecyclers.org/about-waste-wood/wood-recycling-information/>

http://en.wikipedia.org/wiki/Wood_preservation

<http://www.wasteminz.org.nz/wp-content/uploads/Scott-Rhodes.pdf>

<http://www.brighthub.com/environment/green-living/articles/106146.aspx>

*bois de charpente et de construction