

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

Module 7A :

**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 aurait dû être remplacé

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

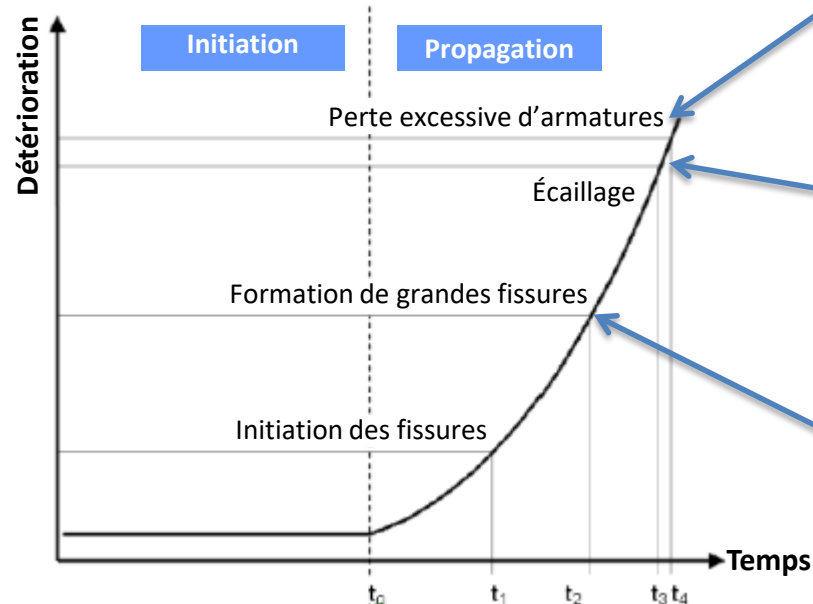


Comment le béton armé est endommagé par la corrosion

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)



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

Un choix judicieux des matériaux est
un bon investissement à long terme

La jetée Progreso (1/3)^{5,6}



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.

La jetée Progreso (2/3)



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

La jetée Progreso (3/3)

Travaux de Génie
Civil durables avec
l'acier inoxydable



Pendant tout ce temps, elle n'a pas nécessité d'entretien et pourtant elle est restée intacte.

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 Hong Kong - Zhuhai - Macao⁹ **(la construction a commencé en 2009 et sera achevée en 2018)**

Le pont prestigieux de l'autoroute Hong Kong - Zhuhai - Macao est actuellement l'un des plus grands projets du monde. La durée de vie exigée est de 120 ans sans entretien. C'est pourquoi des armatures en acier inoxydable ont été spécifiées dans les zones critiques de la structure, principalement dans les zones exposées aux éclaboussures. Au final, 15 000 tonnes d'acier inoxydable seront utilisées.



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

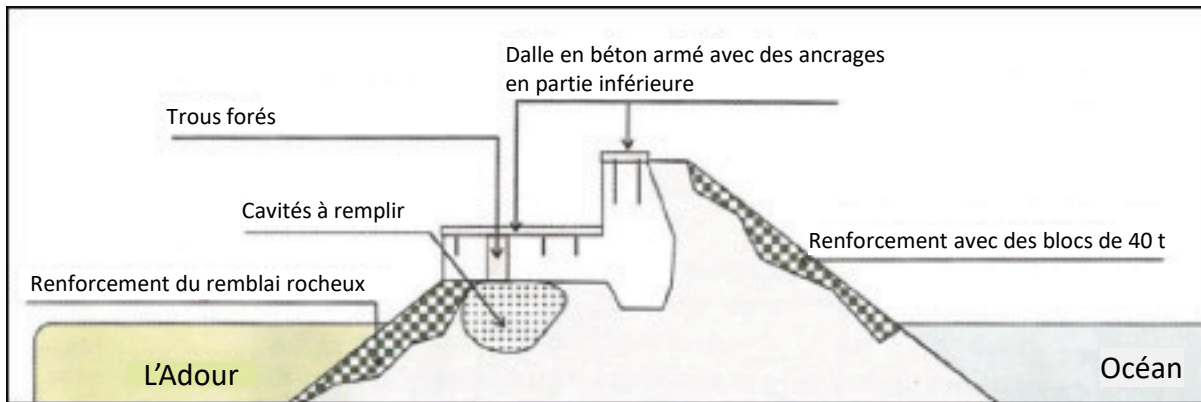
Le côté océan est plus haut et il est protégé par des blocs de 40 t qui doivent être remplacés au fur et à mesure de leur usure par les tempêtes.

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 de Stonecutters à Hong Kong^{12,13}

La portée de ce pont à haubans est la deuxième plus grande au monde (1018 m)

Les pylônes ont une hauteur de 298 m avec 1 600 tonnes d'acier inoxydable dans la zone d'ancrage des haubans et 2800 tonnes d'armatures en acier inoxydable dans les parties inférieures, en béton armé, des pylônes.



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. <http://www.nachi.org/visual-inspection-concrete.htm> visual inspection of concrete
5. <http://www.nickelinstitute.org/en/Sustainability/LifeCycleManagement/LifeCycleAssessments/LCAProgresoPier.aspx> (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'innox: Le Choix de la durée (French) <http://www.infociments.fr/publications/ciments-betons/collection-technique-cimbeton/ct-t81>
16. Armaduras de Acero Inoxidable (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>

Merci !