

Acier inoxydable Lean duplex : une solution pour lutter contre la corrosion du béton armé exposé à des environnements chlorurés sévères – résultats sur sites après 9 ans

Eric Chauveau¹, Véronique Bouteiller², Thierry Chaussadent³, Philippe Mauger¹, Amandine Bonnet²

¹ Ugitech Swiss Steel Group, CRU, Avenue Paul Girod, 73403 Ugine, France

² Univ Gustave Eiffel, MAST-EMGCU, F-77454 Marne - la- Vallée, France

³ Univ Gustave Eiffel, MAST-CPDM, F-77454 Marne - la- Vallée, France

RESUME Un suivi par des méthodes électrochimiques non destructives d'armatures métalliques en acier au carbone et en aciers inoxydables est mené en parallèle depuis 10 ans pour deux types d'exposition : d'une part, des conditions accélérées avec une addition de chlorures au gâchage et avec une exposition en enceinte climatique pour les prismes ; et d'autre part, des conditions naturelles dans le port de La Rochelle pour les poutrelles. Le potentiel libre des armatures se situent pour les 2 expositions à des valeurs similaires : ≈ -500 mV/ECS pour l'acier et ≈ -50 mV/ECS pour le 1.4362. La densité de courant de corrosion est très élevée pour les prismes en acier standard, ce qui est due à la forte corrosion initiée par les ions chlorures. Par contre, dans les deux cas, la densité de corrosion de l'inox 1.4362 est très faible après 10 ans soit $0,001 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les prismes et $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les poutrelles, ce qui traduit l'absence de corrosion.

Mots-clefs acier inoxydable, corrosion, béton armé, duplex, armature

Key-words stainless steel, corrosion, duplex, rebar, concrete

I. INTRODUCTION

L'objectif de ces travaux est de démontrer que pour les environnements chlorurés sévères de type eau de mer, l'acier inoxydable lean duplex peut être une alternative à l'acier au carbone dans les structures de génie civil. Bien que le coût initial de l'acier inoxydable soit notablement supérieur à celui de l'acier au carbone (rapport de 3 à 7 suivant les nuances), l'avantage résidera dans une durée de vie plus longue sans dégradation de la structure et donc sans entretien (analyse du cycle de vie). De nombreux projets ont été consacrés au comportement de l'acier inoxydable pour cette application (Bertolini and Gastaldi 2011, Serdar, Žulj et al. 2013, Bautista, Paredes et al. 2015, Lollini,

Carsana et al. 2019, Saire-Yanez Julio, Alexander et al. 2021), mais la démarche de mener en parallèle une exposition accélérée en laboratoire, et une exposition sur un site naturel s'avère originale (Bouteiller, Chauveau et al. 2023).

Dans une première partie d'études, l'évolution de la corrosion de corps d'épreuves en béton armé chlorurés au gâchage a été étudiée au laboratoire en fonction :

- De la composition de l'armature : acier au carbone (Fe E235) et différentes nuances d'acier inoxydables 1.4021 (martensitique) et trois nuances de duplex 1.4062, 1.4362 et 1.4462.
- De l'exposition : enceinte climatique (45°Celsius et 92% Humidité Relative) permettant d'accélérer la corrosion.
- Du temps : période de 9 années.

Dans une deuxième partie d'études, des poutrelles en béton armé avec acier au carbone ou acier inoxydable duplex 1.4362 sont exposées dans un environnement maritime (zone de marnage) à La Rochelle, France.

Des inspections visuelles et des caractérisations électrochimiques ont été utilisées pour suivre la corrosion des différents prismes et poutrelles en fonction du temps depuis 10 ans. Des autopsies seront prochainement menées.

II. METHODOLOGIES EXPERIMENTALES

A. Exposition en laboratoire en enceinte climatique

Les prismes en béton armé ont pour dimension 150x50x50 mm. La formulation du béton est la suivante :

- Ciment Portland CEM I 52,5 N CE CP2 NF (275 kg/m³)
- Squelette granulaire Palvadeau (de 0 à 16 mm),
- Rapport eau/ciment = 0,7 (EN 1766), gâchage avec NaCl (8% de Cl⁻ par rapport au poids de ciment), R_c = 23 Mpa (sur éprouvettes cylindriques 11*22 cm après 28 jours)
- Enrobage béton = 22 mm.

Les armatures métalliques utilisées sont de différentes natures : barre lisse (L=20 cm - Ø=0,6 cm) en acier carbone Fe E235 et en aciers inoxydables 1.4021, 1.4062, 1.4362 et 1.4462.

La figure 1a permet de visualiser un prisme, et la figure 1b donne la disposition des prismes dans l'enceinte climatique.

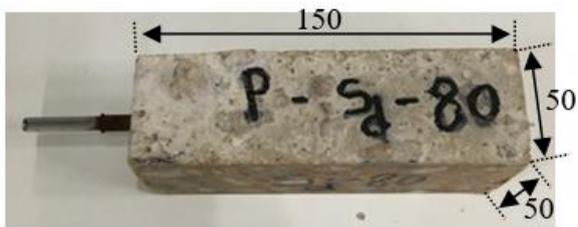


FIGURE 1a. exemple d'un prisme



FIGURE 1b. disposition des primes dans l'enceinte climatique à 45°C et 92% d'humidité relative

B. Exposition en site naturel à La Rochelle

Les poutrelles en béton armé ont pour dimensions 1000x250x100 mm.

- Formulation du béton : ciment Portland, squelette granulaire Palvadeau (de 0 à 20mm), rapport eau/ciment = 0,7, Rc = 35 Mpa,
- Armatures : deux barres crantées (L=150cm - $\varnothing=2$ cm) avec deux matériaux : acier carbone et acier inoxydable lean duplex 1.4362
- Enrobage béton : 30 mm

Les figures 2a et 2b a présentent les dimensions des poutrelles et leur disposition dans le port de La Rochelle, ici à marée basse.

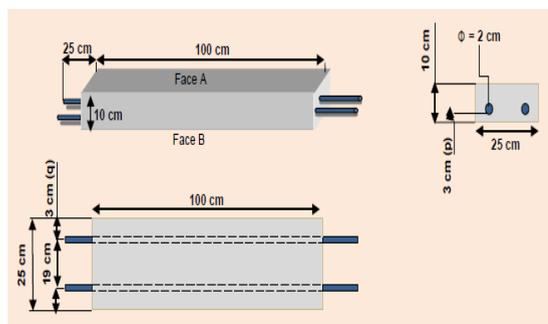


FIGURE 2a. exemple d'une poutrelle



FIGURE 2b. disposition des poutrelles à La Rochelle au pied de la tour Saint Nicolas

C. Méthodologies d'analyses non destructives

Les caractérisations électrochimiques sont réalisées à l'aide d'un potentiostat : 10 ou 20 prismes par nuance d'acier, 4 campagnes de mesures par an pour les prismes, 1 mesure annuelle pour les poutrelles (5 mesures par acier soient 10 mesures par poutrelle) ; les dispositifs sont illustrés en figures 3a et 3b :

- Mesure du potentiel libre de l'armature,
- Mesure de la résistance de polarisation linéaire de l'armature : la polarisation de l'armature est effectuée à l'aide de la contre-électrode avec un balayage dynamique de $\pm 10\text{mV}$ autour de E_{corr} à une vitesse de $0,0832 \text{ mV/s}$. Près du potentiel libre de corrosion E_{corr} , la courbe peut être assimilée à une droite ayant pour équation :

$$\frac{1}{R_p + R_e} = \frac{\Delta i}{\Delta E}$$

R_p : résistance de polarisation linéaire

R_e : résistance du béton et de l'électrolyte (Impédance et diagramme de Nyquist)

La résistance de polarisation linéaire (dont l'unité est l'ohm) est donc calculée d'après l'équation :

$$R_p = \frac{\Delta i}{\Delta E} - R_e$$

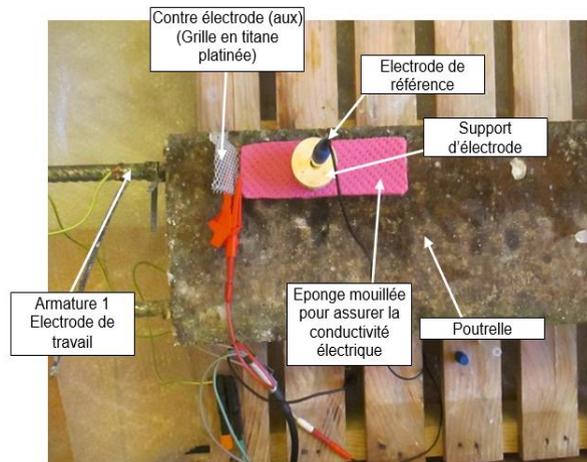
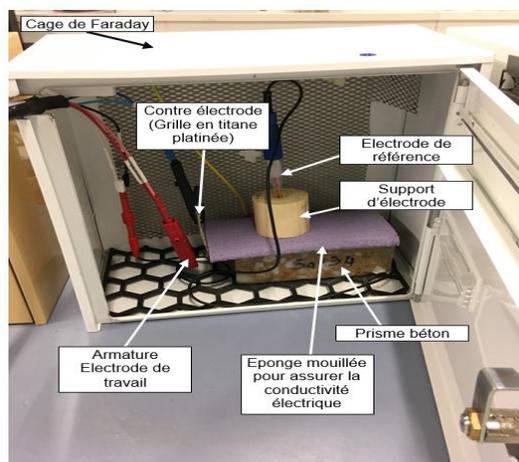
- Mesure de la résistance du béton et de l'électrolyte (correction de la chute ohmique),
- La densité de courant de corrosion i_{corr} est calculée à l'aide de l'équation de Stern et Geary :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p \times S}$$

B est une constante (choisie égale à 26 mV),

R_p (ohm) est la résistance de polarisation linéaire

S est la surface d'armature étudiée en cm^2 ($S = \pi DL = \pi \times 0,6 \times 10 = 18,85 \text{ cm}^2$).



FIGURES 3a et 3b. dispositif de mesures électrochimiques pour un prisme et une poutrelle

III. RESULTATS

A. Exposition en laboratoire en enceinte climatique

- Potentiel libre:

La figure 4 donne l'évolution du potentiel libre en fonction de la durée d'exposition pour différentes nuances d'acier et d'acier inoxydable.

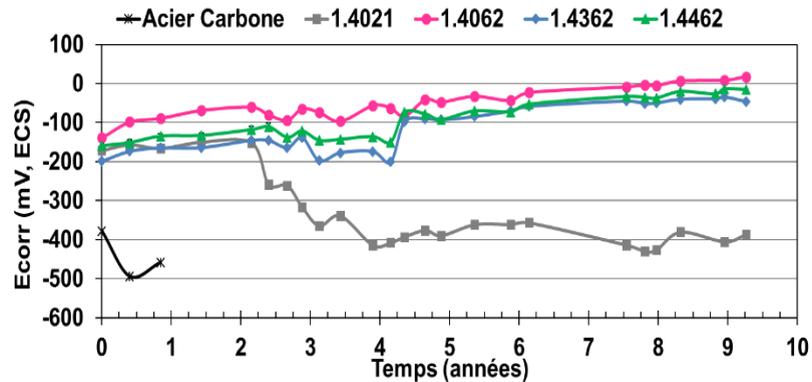


FIGURE 4. Evolution du potentiel libre en mV/ECS en fonction de la durée d'exposition pour différentes nuances d'acier et d'acier inoxydable

- Densité de courant de corrosion :

La figure 5 donne l'évolution de la densité de courant en fonction de la durée d'exposition pour différentes nuances d'acier et d'acier inoxydable.

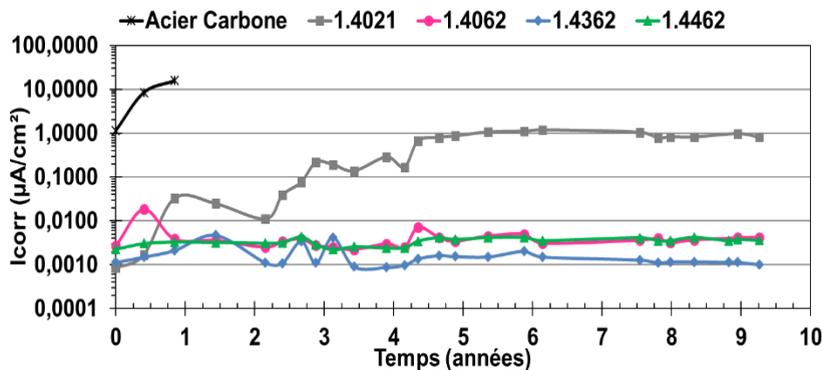


FIGURE 5. Evolution de la densité de courant de corrosion en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ en fonction de la durée d'exposition pour différentes nuances d'acier et d'acier inoxydable

Les mesures pour l'acier carbone sont interrompues suite à l'éclatement du béton.

L'acier inoxydable martensitique 1.4021 a montré un comportement qui a évolué avec le temps (figures 4 et 5). Entre 2,2 et 4,5 années, les valeurs de potentiel et de densité de courant ont significativement et progressivement évolué (diminution du potentiel de -180 mV (à 2 années) jusque -400 mV (à 4,5 années) et augmentation de la densité de courant de corrosion de 0,01 (à 2 années) jusque $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (à 4,5 années)). Ces résultats pourraient correspondre à de la corrosion par piqûre de l'acier martensitique. Entre 4,5 et 9 années d'exposition, les valeurs de potentiel et de

densité de courant restent stables. Une autopsie est programmée en 2023 afin de valider ces résultats (piqûre de l'acier, interface acier/béton et fissuration du béton depuis l'intérieur vers l'extérieur).

Les trois aciers inoxydables duplex 1.4062, 1.4362 et 1.4462 ont des comportements très similaires avec peu d'évolution (figures 4 et 5). Sur la période de 9 années, les valeurs de potentiels deviennent plus électropositives (environ -150 mV vers -50 mV) et les densités de courant de corrosion restent de l'ordre de $0,01\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (soit 2 décades inférieures à l'acier martensitique). Ces résultats montrent qu'il n'y a pas de modification des caractéristiques électrochimiques.

B. Exposition en site naturel à La Rochelle

Pour l'acier au carbone, les potentiels d'abandon décroissent régulièrement depuis 10 ans jusqu'à -500 mV/ECS (figure 6) et témoignent d'une probabilité de corrosion certaine suivant les recommandations de la Rilem. La densité de courant de corrosion reste supérieure à $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (figure 7) depuis 2 années consécutives, ce qui traduit un niveau élevé de corrosion suivant les recommandations de la Rilem. Ces résultats démontrent la corrosion active de l'acier qui induit la fissuration visuelle du béton d'enrobage.

Pour l'acier inoxydable duplex 1.4362, les valeurs de potentiels d'abandon sont de l'ordre de -70 mV/ECS (figure 6) et les densités de courant de corrosion sont de l'ordre de $0,2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (figure 7). Cette valeur est supérieure d'une décade par rapport à 2021. Elle reste inférieure d'une décade par rapport à l'acier carbone et démontre sa meilleure résistance à la corrosion. Aucun signe visuel de corrosion ou de fissuration n'a été détecté.

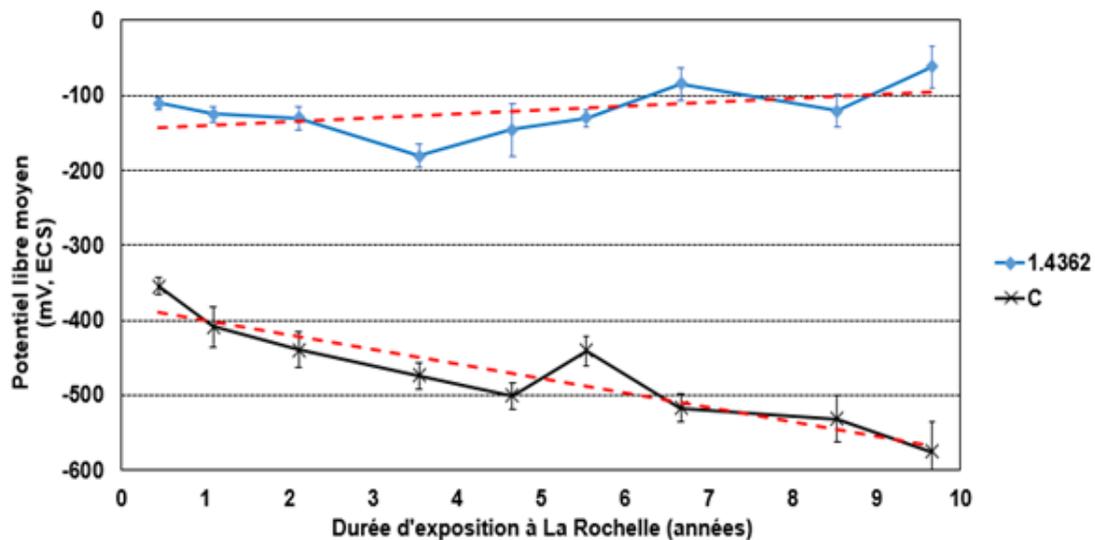


FIGURE 6. Evolution du potentiel libre en mV/ECS en fonction de la durée d'exposition pour les 2 armatures acier C et inox 1.4362 à La Rochelle

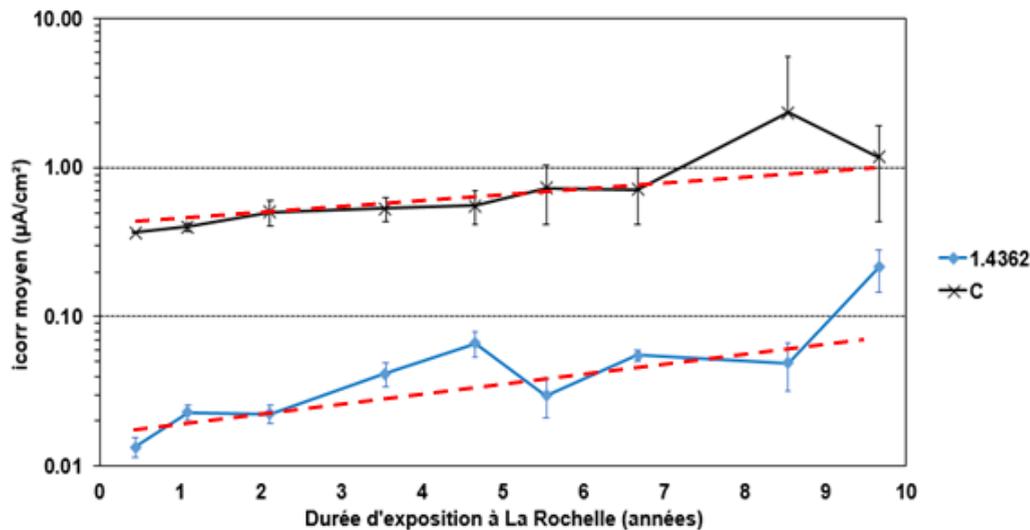


FIGURE 7. Evolution de la densité de courant en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ en fonction de la durée d'exposition pour les 2 armatures acier C et inox 1.4362 à La Rochelle

IV. CONCLUSION

Un suivi par des méthodes électrochimiques non destructives d'armatures métalliques en acier au carbone et en aciers inoxydables a été mené en parallèle pour deux types d'exposition : d'une part, des conditions accélérées avec une addition de chlorures au gâchage et avec une exposition en enceinte climatique ; et d'autre part, des conditions naturelles dans le port de La Rochelle.

Le potentiel libre des armatures se situent pour les 2 expositions à des valeurs similaires : ≈ -500 mV/ECS pour l'acier et ≈ -50 mV/ECS pour le 1.4362. La densité de courant de corrosion est très élevée pour les prismes en acier standard, ce qui est due à la forte corrosion initiée par les ions chlorures. Par contre, dans les deux cas, la densité de corrosion de l'inox 1.4362 est très faible après 10 ans soit $0,001 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les prismes et $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les poutrelles, ce qui traduit l'absence de corrosion ; cette différence de densités entre les deux expériences pourrait trouver son origine dans l'état de surface étudié, lisse dans les prismes et cranté dans les poutrelles.

REFERENCES

Julio Saire-Yanez, Christopher L. Alexander and Alberto A. Sagüés (2021): The Corrosion Propagation Stage of Stainless Steel Reinforced Concrete: A Review. *Corrosion*, 77(8), 812-828.

Bautista, A., E. C. Paredes, F. Velasco and S. M. Alvarez (2015): Corrugated stainless steels embedded in mortar for 9 years: Corrosion results of non-carbonated, chloride-contaminated samples. *Construction and Building Materials*, 93, 350-359.

Bertolini, L. and M. Gastaldi (2011): Corrosion resistance of low-nickel duplex stainless steel rebars. *Materials and Corrosion*, 62(2), 120-129.

Bouteiller, V., E. Chauveau, T. Chaussadent, L. Adelaide, A. Bonnet, P. Mauger and R.-P. Martin (2023). Lean duplex stainless steel: a solution to prevent corrosion for reinforced concrete exposed to severe chloride environments, *EUROCORR'23 Bruxelles*, Belgium.

Lollini, F., M. Carsana, M. Gastaldi and E. Redaelli (2019). "Corrosion behaviour of stainless steel reinforcement in concrete. *Corrosion Reviews*, 37(1), 3-19.

Saire-Yanez Julio, C. L. Alexander and A. Sagües (2021). The corrosion propagation stage of stainless steel reinforced concrete: A Review. *Corrosion Journal*, 77(8), 812-828.

Serdar, M., L. V. Žulj and D. Bjegović (2013). Long-term corrosion behaviour of stainless reinforcing steel in mortar exposed to chloride environment. *Corrosion Science*, 69, 149-157.