

Simulation numérique et diagnostic de la corrosion dans les structures de génie civil

David GARCIA ^{1,2}

¹ Université de Toulouse, INSA, UPS, LMDC, 135, Avenue de Rangueil 31077 Toulouse Cedex 4, France

² CORROHM, 10, Avenue de l'Europe, 31520 Ramonville Saint-Agne, France

RESUME Cet article illustre l'intérêt et la faisabilité de la simulation numérique de la corrosion de l'acier de construction en contexte de diagnostic des structures de génie civil. Les méthodes d'investigation usuelles, jointes à des hypothèses empiriques consacrées par l'usage, conduisent à des interprétations souvent incertaines ou n'ayant qu'une valeur qualitative. Aujourd'hui, une meilleure compréhension de la physique de la corrosion, conjuguée à la puissance du calcul aux éléments finis, permet cependant de construire des modèles électrochimiques tridimensionnels, élaborés, robustes et utiles pour poser un diagnostic et/ou un pronostic quantifié et plus fiable. Ces modèles, qualifiés de jumeaux numériques s'appuient sur l'assemblage de différentes lois physiques, chimiques et électrochimiques et intègrent notamment le transport du dioxygène jusqu'aux armatures en contexte insaturé, mais aussi la production et la précipitation des produits de corrosion en fonction de l'état de saturation. Le potentiel de cette approche en devenir est illustré ici sur un cas d'étude numérique de corrosion de l'acier dans le béton et sur un cas d'étude réel de diagnostic de corrosion de palplanches dans un sol hétérogène.

Mots-clefs Corrosion, Acier, Diagnostic, Simulation numérique, Structures de génie civil

I. INTRODUCTION

De nombreuses décennies d'utilisation intensive des métaux dans la construction industrielle font aujourd'hui de la corrosion la première cause de dégradation prématurée des infrastructures au sens large. Tous secteurs confondus, le coût total de la corrosion est estimé à environ 4% du produit intérieur brut en moyenne dans les pays industrialisés (Koch *et al.*, 2002; Bardal, 2004). Outre le poids économique, la corrosion des infrastructures pose de réels problèmes en termes de sécurité des usagers et alourdit de façon significative l'empreinte carbone (consommation de ressources et d'énergie pour la réparation ou la reconstruction).

L'effondrement du pont Morandi à Gênes en août 2018 a profondément marqué les esprits et amorcé une prise de conscience collective sur le vieillissement inquiétant des infrastructures et la nécessité de leur entretien (Rania *et al.*, 2019). Une étude italienne s'est appuyée sur de nombreux documents publics pour dresser l'historique du pont, depuis sa construction dans les années 1960 jusqu'à son effondrement en 2018. Cette étude forensique a mis en évidence le rôle prépondérant de la corrosion des armatures dans l'effondrement de l'ouvrage d'art génois (Calvi *et al.*, 2019).

Lorsqu'un état avancé de corrosion est atteint, l'approche curative est indispensable pour enrayer sa propagation et les désordres structuraux potentiels. Dans un tel contexte, les technologies

diagnostic de corrosion et de maintenance électrochimique des structures ont connu un essor important dans le domaine du génie civil. Si le principe de ces techniques n'est pas à remettre en cause, le niveau de maîtrise scientifique et technologique de la corrosion de l'acier dans les infrastructures civiles n'est toujours pas satisfaisant malgré plusieurs décennies d'efforts humains et financiers investis dans la recherche. L'amélioration du processus global de réhabilitation des structures affectées par la corrosion nécessite donc une rationalisation de la connaissance phénoménologique et des approches métrologiques et technologiques actuelles. Ce constat plaide en faveur d'un changement de paradigme profond quant à la description des phénomènes électrochimiques. Ce changement, initié depuis une vingtaine d'années par quelques auteurs (Ožbolt, Balabanić and Kušter, 2011; Cao, 2014; Laurens *et al.*, 2016), porte principalement sur la prise en compte rigoureuse du caractère tridimensionnel de l'ensemble des phénomènes à l'œuvre lors de la corrosion de l'acier dans les structures de génie civil. De plus en plus de scientifiques de par le monde suivent aujourd'hui cette voie.

Afin d'accroître le niveau de maîtrise technologique du problème, un système de corrosion impliquant de l'acier dans le béton armé ou dans le sol doit en effet être considéré comme un problème physique 3D non réductible à un problème 1D équivalent. L'ensemble des phénomènes physiques en jeu (transfert de charge, transfert diffusif...) et les spécificités de la structure à protéger (géométrie des éléments et du ferrailage, environnement, disponibilité en dioxygène...) ne peuvent être rigoureusement appréhendés que dans le cadre d'une modélisation tridimensionnelle, ou a minima bidimensionnelle dans certains cas particuliers (Garcia, 2020). De plus, le caractère unique de chaque ouvrage rend difficile l'établissement de protocoles génériques de diagnostic.

Face à la difficulté, voire l'impossibilité, de construire un protocole générique de diagnostic de corrosion des ouvrages, il semble intéressant de proposer de nouvelles approches d'investigation *in situ*, basées sur une métrologie de terrain mieux maîtrisée et s'appuyant sur des outils de simulation numérique 3D fidèles à la réalité phénoménologique complexe de la corrosion. Ce nouveau type d'investigation, pouvant être qualifié de **diagnostic de corrosion assisté par ordinateur** (DCAO) repose sur le principe de **jumeau numérique** dont le concept a été introduit par Grieves en 2002 lors d'une conférence de la SME (Society of Manufacturing Engineers) (Grieves, 2014). Le principe de jumeau numérique consiste ici à construire un modèle réaliste de la structure à risque de corrosion afin de consolider l'interprétation des données expérimentales collectées *in situ* et de fiabiliser ainsi le diagnostic. Le modèle numérique est étroitement lié à la structure investiguée non seulement par le réalisme de la modélisation (géométrie, environnement, phénomènes physiques sous-jacent...) mais aussi par son paramétrage avec des données de terrain adéquates (propriétés physico-chimiques des matériaux, comportement électrochimique du métal dans l'électrolyte, conditions aux limites...).

Le potentiel de cette approche en devenir est illustré ci-après par le biais de deux exemples pédagogiques :

- Un cas d'étude numérique 2D de corrosion de l'acier dans le béton, montrant l'influence du degré de saturation sur la nature et la spatialisation des hydroxydes de fer formés ; ce

cas d'étude permet de montrer la robustesse de l'approche de modélisation permettent de prédire fidèlement l'effet de la saturation et du transport du dioxygène sur la nature des oxydes précipités ;

- Un cas d'étude réel de diagnostic de corrosion de palplanches dans un sol hétérogène, pour lequel la simulation numérique a permis de consolider le diagnostic.

L'ensemble des détails relatifs à ces travaux (modèles physiques et électrochimiques, paramètres, hypothèses) est décrit précisément dans (Garcia, 2020). Tous les travaux numériques présentés ci-après sont réalisés à l'aide du logiciel de calcul aux éléments finis COMSOL MULTIPHYSICS®.

II. INFLUENCE DE L'ETAT DE SATURATION DU BETON SUR LES PRODUITS DE CORROSION DE L'ACIER

La corrosion des armatures dans le béton résulte d'un couplage galvanique entre :

- Des sites d'acier actif : sièges de réactions anodiques conduisant à la dissolution locale du métal et à la libération d'ions ferreux dans la solution interstitielle du béton ;
- Des sites d'acier passif : sièges de réactions cathodiques consommant le dioxygène dissous dans la solution interstitielle et formant des ions hydroxydes.

Une fois ces produits primaires formés, la précipitation de produits de corrosion secondaires dans l'espace poreux est susceptible de conduire à la fissuration du béton. Le degré de saturation du béton joue un rôle prépondérant sur la cinétique de corrosion galvanique de l'acier mais également sur la nature des hydroxydes de fer précipités dans les pores de la matrice cimentaire (Raupach, 1996). Sur la base d'un cas d'étude numérique, on présente ici des éléments de discussion sur les conditions favorables de précipitation de produits de corrosion expansifs (hydroxydes ferriques $Fe(OH)_3$) ou au contraire peu expansifs (hydroxydes ferreux $Fe(OH)_2$).

Le modèle géométrique 2D étudié est présenté dans la Figure 1 : enrobage de 6 cm ; longueur de 20 cm – spot de corrosion centré de 1 cm. On prend ici en compte le transport du dioxygène qui peut limiter la réaction cathodique et affecter la nature des produits de corrosion précipités. Le dioxygène est fourni uniquement par la face supérieure du domaine à la pression atmosphérique. Le degré de saturation est considéré comme uniforme dans le volume de béton. La Figure 1 illustre également de manière schématique les différentes variables prises en compte lors de la simulation numérique. Tous les calculs ont été réalisés en régime instationnaire, mais les résultats discutés ci-après ne sont présentés que pour une seule échéance de temps (5 ans) afin de faciliter la mise en lumière des conclusions qualitatives de l'étude.

L'objectif de cette étude consiste à illustrer le principe du couplage entre les aspects cinétiques et thermodynamiques dans une optique de description phénoménologique des zones de précipitations des hydroxydes ferreux et ferriques. Une étude paramétrique est ensuite menée pour évaluer l'influence du degré de saturation sur la cinétique de précipitation et la nature des produits de corrosion précipités.

Prédire la précipitation de tel ou tel produit de corrosion nécessite l'intégration du diagramme de Pourbaix dans l'approche de modélisation (Pourbaix, 1974; McCafferty, 2010). Le diagramme de Pourbaix de l'acier étant directement lié au pH et à la concentration en cations métalliques, ce concept théorique peut être généralisé à l'ensemble du volume de béton. A chaque instant, chaque point du domaine de calcul est ainsi associé à une valeur de pH , une concentration en cations métalliques et un potentiel. Il est donc possible de tracer un diagramme de Pourbaix local propre à chaque point du domaine et à chaque instant. En un point donné et à un instant donné, il suffit ensuite de positionner le couple potentiel E - pH local dans le diagramme local pour identifier la forme stable du fer en ce point.

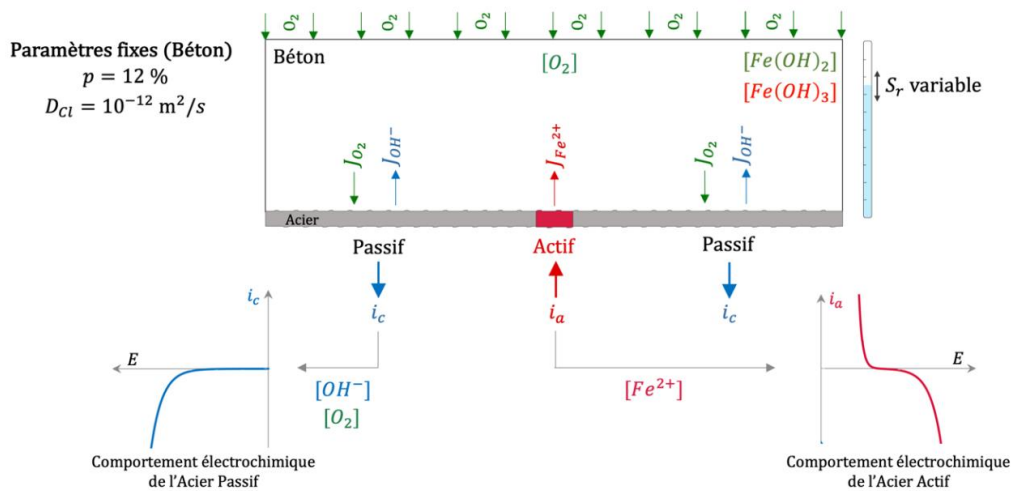


FIGURE 1. Représentation schématique du modèle numérique 2D et des différentes variables de la simulation

La Figure 2 illustre un résultat de cette simulation, relatif à la distribution des hydroxydes de fer II (en vert) et III (en rouge) précipités dans l'environnement du site actif pour différents degrés de saturation entre 75% et 95%. Pour chaque hydroxyde, dans un souci de lisibilité de l'illustration, un seuillage ternaire est choisi afin de dissocier les zones de précipitation préférentielles, près du site actif, des zones périphériques où la concentration en cations métalliques devient très faible ; la couleur blanche est associée à une concentration locale inférieure à 1 mol/m^3 de béton, quel que soit l'hydroxyde considéré. Dans les zones de précipitation significative, deux codes couleurs par hydroxyde permettent de dissocier les zones de concentrations d'hydroxydes supérieures et inférieures à 100 mol/m^3 de béton. Ce graphique combine ainsi les aspects thermodynamiques (domaines d'existence) et les aspects cinétiques (concentrations locales).

On note un effet très marqué de l'état de saturation sur la nature des produits de corrosion précipités. Pour les états de saturation modérée ($\leq 85\%$), on observe une prédominance des hydroxydes ferriques expansifs $Fe(OH)_3$, formés en quantité significative. A l'inverse, les états de forte saturation conduisent à la formation préférentielle d'hydroxydes ferreux peu expansifs ($Fe(OH)_2$). Cet effet du degré de saturation sur la nature des oxydes formés est directement lié au

transport du dioxygène, freiné en milieu saturé. Ce résultat est en accord avec les observations de terrain, en particulier dans le cas des structures maritimes partiellement immergées.

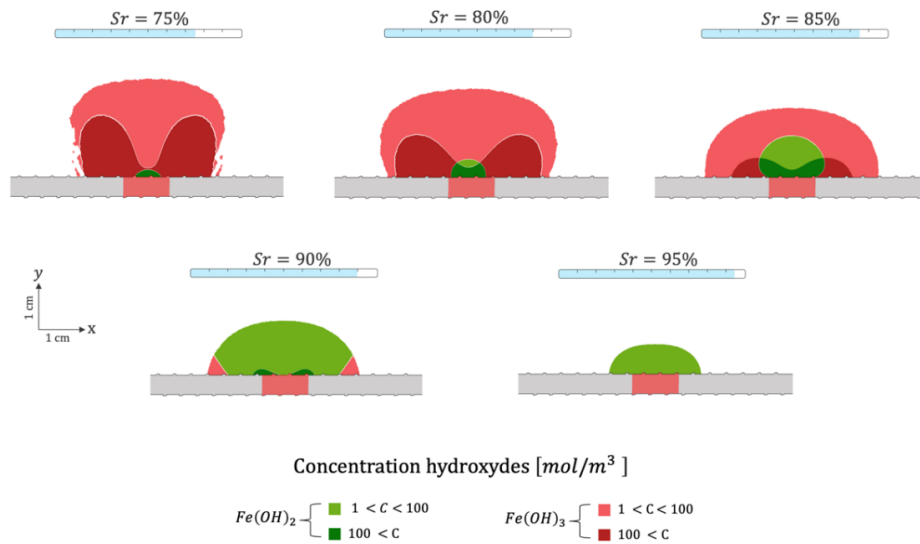


FIGURE 2. Champs de concentrations en hydroxydes ferreux et ferriques dans le volume de béton après 5 ans de corrosion active en fonction du degré de saturation du béton (illustrations à l'échelle)

En zone maritime, les éléments de béton émergés, situés au-dessus de la zone de marnage riche en dioxygène, sont notoirement plus sujets à l'endommagement par corrosion des aciers. Ils sont ainsi affectés d'un risque de corrosion plus élevé par la norme (NF EN 206, 2014) (classe XS3) et doivent satisfaire des dispositions constructives plus exigeantes. Pour les éléments de béton immergés en permanence (XS2), la norme est moins sévère car le retour d'expérience collectif montre une quantité de désordres visibles significativement plus faible que dans les zones émergées (XS3). Les simulations réalisées ici concluent effectivement que la part d'hydroxydes ferriques, responsables de la fissuration, devient négligeable parmi les produits de corrosion formés en zone XS2, saturée et donc pauvre en dioxygène.

III. DIAGNOSTIC DE CORROSION DE PALPLANCHES EN CONTEXTE GEOLOGIQUE HETEROGENE

En contexte géologique hétérogène, l'acier d'un rideau de palplanches au contact d'une couche ou inclusion de sol particulière peut présenter un potentiel de corrosion plus électro-négatif que le reste de l'ouvrage en contact avec un ou des matériaux différents. Il s'ensuit alors une polarisation mutuelle entre ces différentes parties de la structure, la zone de plus faible potentiel étant polarisée anodiquement (i.e. dissolution accélérée par couplage galvanique) et l'autre cathodiquement (i.e. dissolution naturelle ralentie par prévention ou protection cathodique). Un gradient de potentiel s'établit alors dans le volume de sol et un courant galvanique est échangé entre ces cellules anodiques et cathodiques. Ce phénomène a été mis en évidence in situ dans le cadre d'une campagne de diagnostic de corrosion de rideaux de palplanches constituant les culées d'un ouvrage autoroutier (Figure 3). Les phénomènes à l'œuvre étant localisés en profondeur, un profil de

potentiel en forage a été réalisé sur une profondeur de 14 m, à environ 1,5 m de l'ouvrage (Figure 4). A cet effet, une électrode de référence Cu/CuSO₄ montée sur une perche semi-rigide est utilisée pour mesurer le potentiel au contact du sol en fond de forage pour chaque pas d'avancement (1 point par mètre de profondeur).

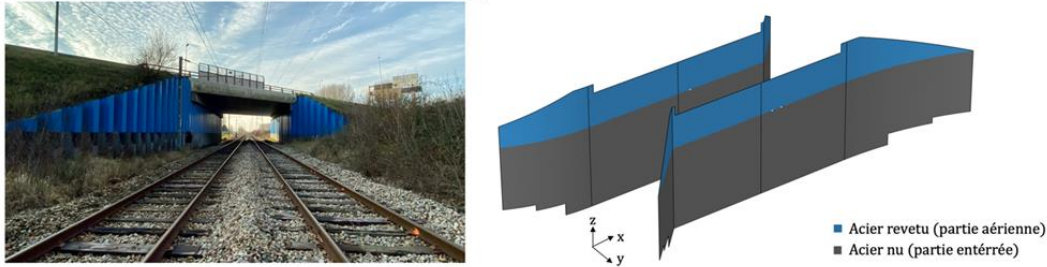


FIGURE 3. Photographie de l'ouvrage diagnostiqué et modèle géométrique 3D des rideaux de palplanches soumis à la corrosion par couplage galvanique induit par l'hétérogénéité du sol



FIGURE 4. Électrode de référence Cu-CuSO₄ montée sur perche semi-rigide (à gauche) et mesure de potentiel en forage (à droite)

Des prélèvements de sol réalisés selon un pas de forage régulier ont révélé une structure géologique à 3 couches, cohérente avec les données du BRGM relatives à la structure lithologique du sous-sol dans le secteur géographique de l'ouvrage (Figure 5) : une couche de surface sableuse d'environ 2 mètres d'épaisseur ; une couche limoneuse (silt mou) d'environ 3 mètres d'épaisseur ; une couche de sable fin profonde au-delà de 5m de profondeur et jusqu'en fond de forage (-14 m). Des prélèvements d'acier ont également été réalisés dans des zones non critiques vis-à-vis de la stabilité mécanique de l'ouvrage. Ces prélèvements d'acier et de sols ont ensuite été utilisés en laboratoire pour constituer des cellules électrochimiques (Figure 5) permettant de mesurer le comportement des palplanches dans leur environnement géologique réel. On estime ainsi une loi de comportement électrochimique de l'acier pour chaque type de sol.

Ces données de terrain et de laboratoire sont ensuite implantées dans un jumeau numérique électrochimique des rideaux de palplanches. La figure 6 présente la confrontation entre le profil de potentiel expérimental mesuré en forage et le profil de potentiel simulé via le jumeau numérique. On observe une très bonne corrélation entre les données expérimentales et les prédictions numériques, validant ici l'approche de modélisation adoptée et l'ensemble des essais préliminaires

réalisés pour alimenter les simulations. L'existence d'un couplage galvanique entre les différentes zones d'acier au contact des 3 matériaux géologiques est attestée par la convergence entre données expérimentales de terrain et résultats numériques. Via un post-traitement des données de simulation, le jumeau numérique permet ensuite de consolider le diagnostic par une estimation réaliste des densités de courant de corrosion locales en profondeur (information non accessible par une mesure expérimentale directe).

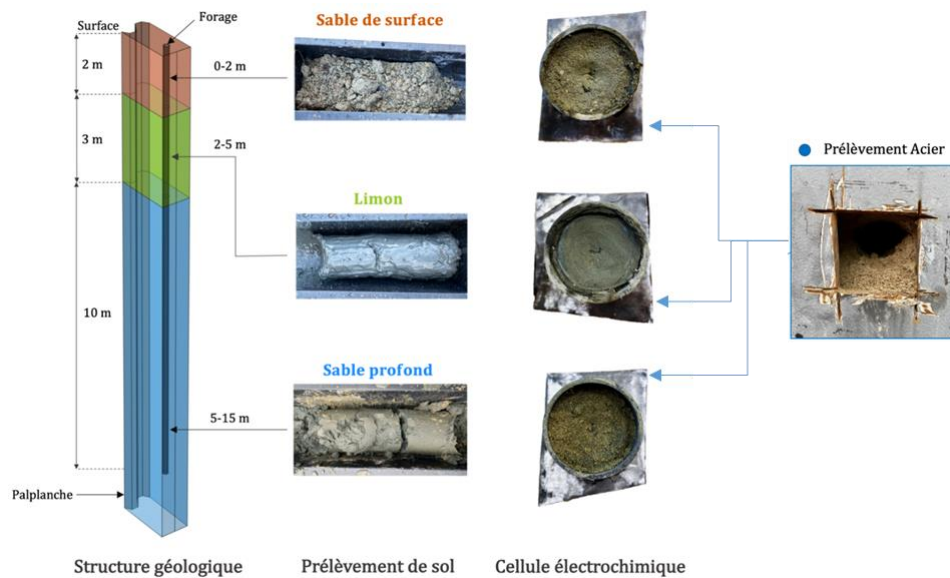


FIGURE 5. Structure géologique identifiée in situ et prélèvements de sols (à gauche) – Zone de prélèvement d'acier (à droite) – Cellules de mesure de comportement électrochimique en laboratoire, basées sur les prélèvements de sols et d'acier (au centre)

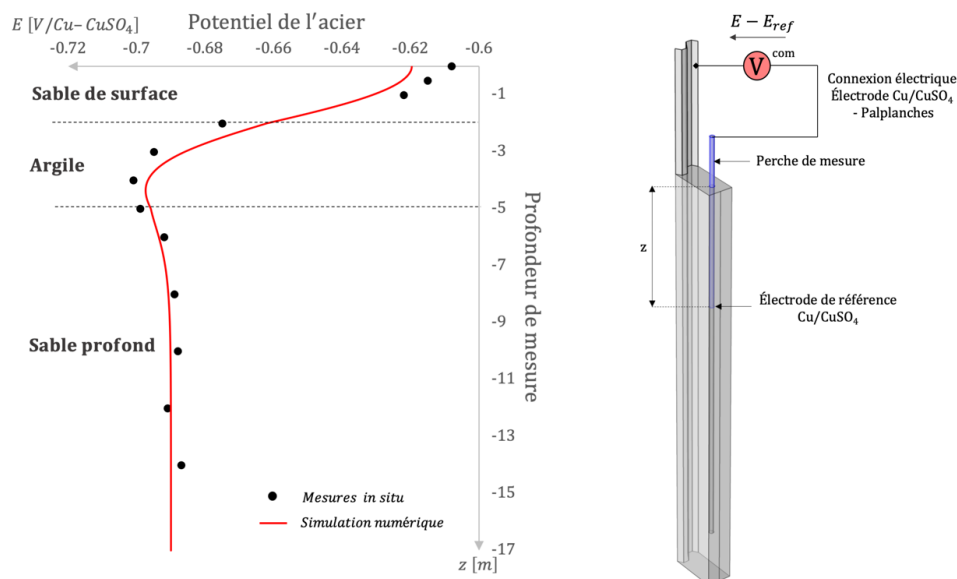


FIGURE 6. Confrontation (à gauche) entre le profil de potentiel expérimental (points noirs) et le profil de potentiel simulé (ligne rouge continue) - Géométrie du jumeau numérique (à droite)

IV. CONCLUSION

Aujourd'hui, une meilleure compréhension de la physique de la corrosion, conjuguée à la puissance du calcul aux éléments finis, permet de construire des jumeaux numériques robustes afin de mieux appréhender les phénomènes électrochimiques complexes à l'œuvre dans les structures de génie civil. Les jumeaux numériques électrochimiques trouvent naturellement des applications en matière de consolidation du diagnostic de corrosion, mais également de conception de solutions optimisées de maintenance électrochimique. Permettant de tenir compte des spécificités de chaque ouvrage (approche non générique), ces nouveaux outils marquent un changement de paradigme profond et salubre dans le domaine de l'ingénierie anticorrosion des structures de génie civil.

REFERENCES

- Bardal, E. (2004) *Corrosion and Protection* | Einar Bardal | Springer. Springer-Verlag London.
- Calvi, G. M. *et al.* (2019) 'Once upon a Time in Italy : The Tale of the Morandi Bridge', *Structural Engineering International*, 8664. doi: 10.1080/10168664.2018.1558033.
- Cao, C. (2014) '3D simulation of localized steel corrosion in chloride contaminated reinforced concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 72, pp. 434–443. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.030.
- Garcia, D. (2020) *Études exploratoires dédiées au diagnostic de corrosion assisté par ordinateur des structures de génie civil*. Université Toulouse 3 - Paul Sabatier. Available at: <http://oatao.univ-toulouse.fr/9278/>.
- Grieves, M. (2014) *Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*.
- Koch, G. *et al.* (2002) *Corrosion cost and preventive strategies in the United States*.
- Laurens, S. *et al.* (2016) 'Steady-state polarization response of chloride-induced macrocell corrosion systems in steel reinforced concrete - Numerical and experimental investigations', *Cement and Concrete Research*, 79, pp. 272–290. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.09.021.
- McCafferty, E. (2010) 'Thermodynamics of Corrosion: Pourbaix Diagrams', in *Introduction to Corrosion Science*. doi: 10.1007/978-1-4419-0455-3_6.
- 'NF EN 206/CN Décembre (2014).
- Ožbolt, J., Balabanić, G. and Kušter, M. (2011) '3D Numerical modelling of steel corrosion in concrete structures', *Corrosion Science*, 53(12), pp. 4166–4177. doi: 10.1016/j.corsci.2011.08.026.
- Pourbaix, M. (1974) 'Applications of electrochemistry in corrosion science and in practice', *Corrosion Science*. doi: 10.1016/S0010-938X(74)80006-5.
- Rania, N. *et al.* (2019) 'The Collapse of the Morandi Bridge in Genoa on 14 August 2018 : A Collective Traumatic Event and Its Emotional Impact Linked to the Place and Loss of a Symbol', *Sustainability*, 11(23).
- Raupach, M. (1996) 'Investigations on the influence of oxygen on corrosion of steel in concrete — Part 2', *Materials and Structures*, 29(4), pp. 226–232. doi: 10.1007/BF02485944.