



Partie 3 – Structures & Monitoring

SUIVI SANS CONTACT DU FRONT DE PROPAGATION DES CHLORURES OU DE CO₂, DANS L'ENROBAGE DES OUVRAGES

MISE AU POINT D'UN SYSTÈME DE CAPTEURS DE DURABILITÉ ORPHELINS

**HOW TO DETECT WITHOUT CONTACT THE PROPAGATION FRONT OF CHLORIDES
OR CO₂ IN STRUCTURES COVERS: DEVELOPMENT OF ORPHAN SENSORS
FOR DURABILITY ISSUES**

Fabien BARBERON^(a), Philippe GEGOUT^(b*)

a. b. : Bouygues TP, 1 rue Guynemer, 78114 Magny-les-Hameaux
* auteur correspondant : p.gegout@bouygues-construction.com

RÉSUMÉ

Les chlorures et le CO₂ sont les deux principaux agents pathogènes qui, après avoir traversé l'enrobage d'une structure, conduisent à la dépassivation puis à la corrosion des armatures. L'instrumentation par suivi de potentiels nécessite des contacts ou des systèmes filaires pour enregistrer ces fronts, sources d'interfaces indésirables, et conduisant souvent à un constat tardif de la dépassivation des armatures. De plus, la nature du ciment ne permet pas toujours de corrélérer de manière fiable les chutes de potentiel et l'amorçage de la corrosion des aciers.

Le système présenté ici est conçu pour anticiper la corrosion des aciers. Il consiste à positionner, lors du coulage du béton frais, des lames d'acier orphelines, d'environ 100 µm d'épaisseur et de diamètre centimétrique, entre la surface de l'ouvrage et le premier rang d'armatures. Les lames sont orientées perpendiculairement au front de diffusion. Lors du contact avec les chlorures ou le CO₂, les lames s'oxydent, de la même manière qu'une armature. Le principe consiste à détecter, dans le béton durci, l'état d'oxydation des lames. Le système utilise les propriétés thermiques du fer pour vérifier son état d'oxydation. Lorsque le fer métallique est soumis à une induction



magnétique variable, il se crée des courants de surfaces (loi de Lenz) qui conduisent à un échauffement rapide et important de la lame de fer (loi d'Ohm). Les lames sont donc soumises à un échauffement par induction depuis la surface. La réponse thermique des lames est ensuite évaluée grâce à un lecteur infrarouge depuis la surface du béton, et nous renseigne sur l'état des lames, oxydées ou non. En effet, contrairement à une lame saine, une lame oxydée verra sa réponse thermique avec une faible amplitude et une décroissance rapide. Les lames, placées en chevrons à espaces réguliers entre la surface et les armatures, et préalablement repérées sur l'ouvrage, il est ainsi possible de déterminer la position du front de propagation à un instant donné, et d'anticiper une réparation éventuelle avant que les ions chlorures ou le CO₂ ne déclenchent la dépassivation des aciers d'enrobage.

ABSTRACT

Chlorides and CO₂ are the two main ions which, having gone through a concrete coating, result in the depassivation and the corrosion of the reinforcement. Instrumentation by monitoring of potential requires contacts or wired systems to record these fronts, sources of unwanted interfaces, and often leading to a late finding of the depassivation of the steels. In addition, the nature of the cement does not always correlate reliably potential falls and initiation of corrosion of steels.

The present system is designed to anticipate the corrosion of steels. It consists to position, during the pouring of the fresh concrete, small isolated steel sheets, of about 100 µm thick and some centimeters diameter, between the surface of the concrete and the first front of steels. The sheets are oriented perpendicularly to the diffusion front. When in contact with chlorides or CO₂, sheets are oxidized, in the same manner as a steel reinforcement.

The principle is to detect, in the hardened concrete, the oxidation state of the steel sheets. The system uses the thermal properties of iron to check its oxidation state. When the metallic iron is subjected to a variable magnetic induction, it creates surfaces currents (Lenz's law) which lead to a quick and important warm up of the iron sheet (Ohm's law). The sheets are therefore subject to heating by induction from the surface. Thermal response of sheets is then evaluated with an infrared reader since the surface of the concrete, and tells us about the state of the sheets, oxidized or not. Indeed, unlike a healthy sheet, oxidized sheet will give its thermal response with a low amplitude and a rapid decay. Sheets, placed in rafters to regular spaces between the surface and the reinforcement, and previously located in the structure, it is thus possible to determine the position of the front of diffusion at any given time, and to anticipate before any repair than ions chlorides or CO₂ lead to the depassivation of the steels.

Mots-clés : béton armé, armatures, corrosion, induction magnétique, mesure infrarouge, CND

* * *

1. INTRODUCTION

Parmi les pathologies responsables de la dégradation pré-maturée du béton armé, la corrosion des armatures, essentiellement issue de la diffusion du CO₂ et/ou des chlorures, reste la plus répandue par le nombre d'ouvrages concernés, et certainement par les coûts inhérents à leur réparation, qu'il s'agisse de bâtiments ou d'ouvrages d'arts. Dans le cadre, tant de la maintenance que de l'expertise liée à l'endommagement des ouvrages, et pour aider au choix des méthodes de réparations ou de protection les mieux adaptées, il est vital d'établir un diagnostic aussi précis que possible. Concernant les armatures, l'apparition de rouille, voire d'éclats de béton sur les parements, sont témoins d'une corrosion déjà largement amorcée au sein du béton.

Si des méthodes semi destructives par prélèvement et analyses sont souvent nécessaires pour affiner les hypothèses issues des observations initiales réalisées sur site, on voit se développer des méthodes non destructives d'auscultation, non ou peu invasives, permettant à l'ouvrage de conserver son intégrité, qu'il s'agisse de raisons structurelles ou esthétiques. Les principes de mesures peuvent être optiques, acoustiques, électriques. Les mesures de suivi de potentiel des armatures, associées à une localisation préalable de ces dernières par radar, permettent, depuis plusieurs années déjà, d'obtenir des informations pertinentes sur l'état d'endommagement des aciers [1]. Les mesures d'émission acoustiques (EA), quant à elles, enregistrent l'apparition des microfissures lors de la corrosion des aciers, mais ne peuvent, de la même manière, que confirmer l'amorçage du phénomène [2], de même que les mesures de déformation par fibres optiques [3].

Hormis l'EA, ces méthodes nécessitent cependant d'établir une connexion physique entre les armatures et le système d'enregistrement des données. Ces connexions filaires créent des interfaces, et, dans le cas d'enregistrements sur des périodes longues par exemple, qui plus est dans des zones peu accessibles, sont susceptibles de « déformer » l'information issue de la zone de mesure concernée par une pollution via ces interfaces. De plus, les récents résultats sur l'initiation de la corrosion par les chlorures font apparaître que la nature du liant impacte fortement sur la mesure, pouvant entraîner une réelle erreur de diagnostic [4]. Enfin, ces méthodes ne renseignent que sur l'état de l'armature à un instant donné, et ne permettent pas ou peu d'anticiper.

L'objectif qui a suscité notre démarche était donc de pouvoir suivre le front d'agression lui-même, et non l'état de corrosion des armatures, de manière à pouvoir le localiser au sein de l'enrobage à tout instant, mais sans contact ni connexion filaire depuis l'extérieur. La mesure devait également rester simple à effectuer. Nous avons pour cela combiné les propriétés thermiques du fer selon son état d'oxydation, et une mesure réalisée depuis la surface de l'ouvrage, non pas sur les armatures, mais sur des éléments métalliques – que nous appellerons capteurs par la suite – jouant le rôle de fusibles, judicieusement disposés au sein de l'enrobage.

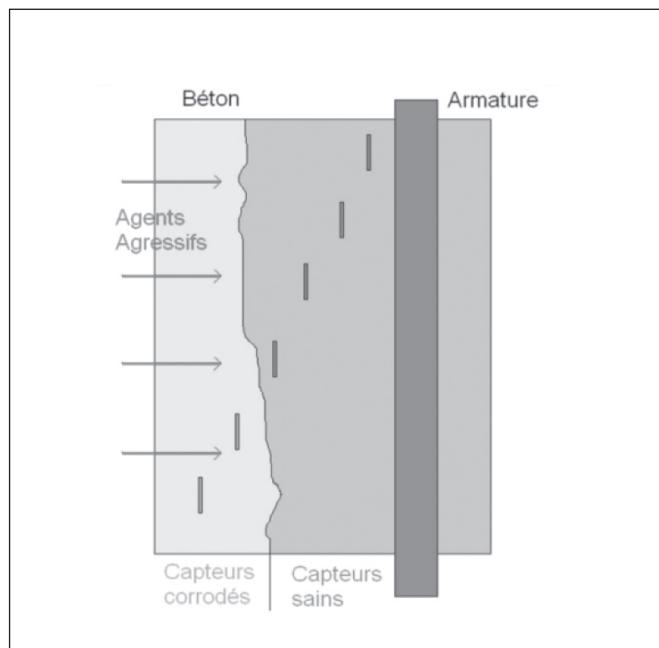


Figure 1 : Vue verticale de la disposition des capteurs au sein de l'enrobage.

2. PRINCIPE ET CHOIX TECHNOLOGIQUES

2.1. Les systèmes existants

Les systèmes existants à ce jour sont pour la plupart basés sur des mesures de suivi de potentiel [3-5-6-7-8]. Chacun présente des avantages et des inconvénients, concernant soit la durée de vie des capteurs utilisés, soit la fiabilité de la mesure, pouvant être perturbée par les conditions environnantes, telles par exemple que les conditions d'humidité locales, modifiant la résistivité du milieu. De même, les coûts de tels systèmes peuvent vite s'avérer rédhibitoires en limitant le nombre d'installations, au final être peu représentatif de l'état global de l'ouvrage. Très récemment, les travaux de Garcia [4] ont montré que la nature des liants, en particulier ceux à base de laitier, pouvait impacter fortement sur le potentiel de corrosion des armatures, et, pour des teneurs en laitier significatives, entraîner des chutes de potentiel non forcément corrélées à une initiation de corrosion des aciers.

2.2. Principe proposé

Le principe proposé ici est basé sur l'association de deux éléments : le positionnement initial de « capteurs » au sein de l'enrobage, et l'utilisation des propriétés thermiques du fer métallique selon son état d'oxydation.

2.2.1. Positionnement des capteurs dans l'ouvrage

Les capteurs sont des lames circulaires ou carrées de fer métallique d'environ $100 \mu\text{m}$ d'épaisseur et d'une surface de l'ordre de quelques centimètres carrés. Ils sont disposés lors du coulage du béton frais et repérés géographiquement

par tout moyen disponible, repère physique sur l'ouvrage, sur plan, par GPS... Ils sont espacés latéralement suffisamment pour éviter d'influer les uns des autres, et positionnés dans l'épaisseur tous les centimètres (figure 1). On veille tout particulièrement, lors de la vibration, à ne pas déplacer le capteur avec l'aiguille vibrante. Des essais ont montré qu'une fois positionné, le capteur ne subissait pas l'influence de la vibration en termes de déplacement, quelle que soit la position de l'aiguille.

Le chlore et le CO_2 progressent par diffusion au sein du matériau. Ce front progresse de manière centripète vers le premier rang d'armatures à travers la pâte de ciment. Lorsque le chlore ou le CO_2 atteignent le capteur, celui-ci se comporte comme une armature et va se corroder. Les capteurs sont orphelins, c'est-à-dire non reliés physiquement d'une quelconque manière entre eux ou à un système extérieur. La réponse individuelle de chacun des capteurs, expliquée ci-dessous, permet ainsi de situer précisément le front d'agression. Le coût des capteurs n'étant que de quelques euros, il est possible de poser un nombre de capteurs suffisant dans des endroits supposés stratégiques ou sensibles pour obtenir une image statistique suffisamment fiable du positionnement du front de pénétration des chlorures ou du CO_2 .

2.2.2. Principe de mesure

La mesure de l'état de corrosion des lames métalliques est basée sur les propriétés thermiques du fer selon son état d'oxydation. Le principe consiste à exciter le capteur par induction magnétique (loi de Lenz), depuis la surface du béton. Cette induction magnétique mobilise plus ou moins d'électrons à la surface du capteur, selon sa conductivité (courants de Foucault). Si le capteur est sain, il est très conducteur et va donc chauffer par effet Joule (loi d'Ohm). A l'inverse, un capteur corrodé s'échauffera beaucoup moins. Ainsi, en étudiant la réponse en température d'un capteur enfoui dans le béton par l'intermédiaire d'une caméra infrarouge, il est possible d'estimer son état de corrosion. Le principe de la mesure est visible sur la figure 2. Pour vérifier la réponse thermique des capteurs après échauffement, des essais ont été préalablement menés sur des capteurs sains et des capteurs corrodés artificiellement par attaque en solution acide (fig. 3).

Ces capteurs ont été introduits à une profondeur de 2 cm dans un prisme de mortier de dimensions $15 \times 6 \times 4$ cm. Ce dernier est ensuite excité pendant 50 s par une induction magnétique sous un champ de quelques micro Tesla. La réponse thermique en surface du prisme est mesurée par thermographie infrarouge en fonction du temps pendant une durée totale de 5 minutes. Les résultats obtenus juste après arrêt de l'induction, puis à 1 min, 2 min et 4 min sont présentés en figure 4.

La première image infrarouge montre clairement deux points chauds. Ces deux points chauds sont localisés précisément à la verticale de l'emplacement des deux capteurs concernés et traduisent donc bien la propagation thermique dans le prisme suite à l'échauffement des capteurs. On constate alors deux phénomènes remarquables qui diffèrent clairement le capteur sain de celui partiellement corrodé.

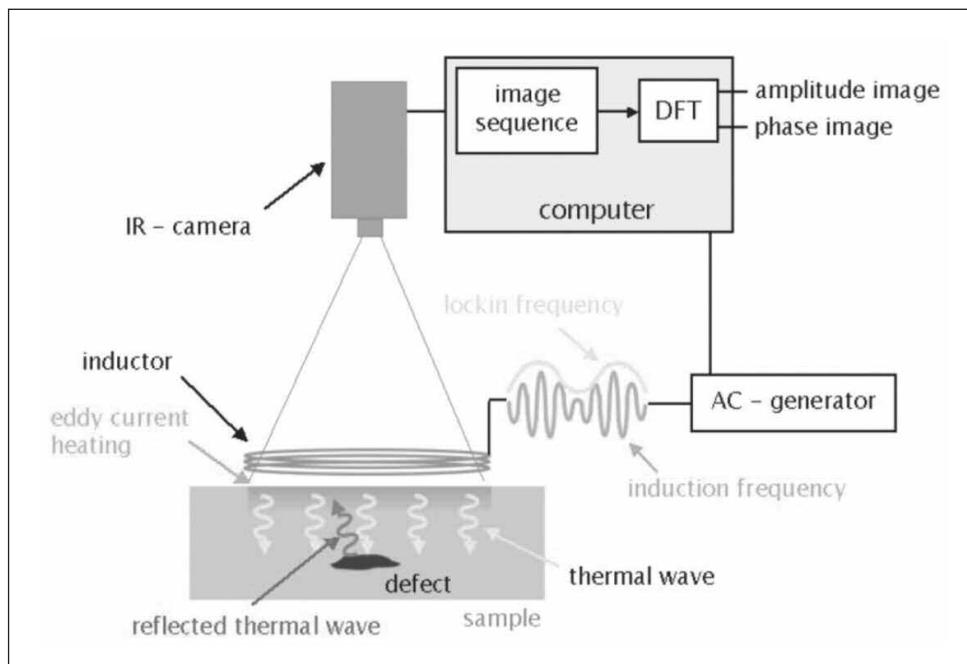


Figure 2 : Principe de mesure de l'état de corrosion des capteurs [9].

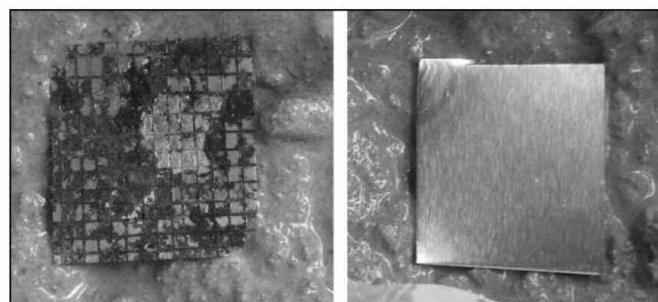


fig. 3a

fig. 3b

Figure 3 : Exemple de capteurs utilisés. (a) capteurs artificiellement corrodés, (b) capteurs sains

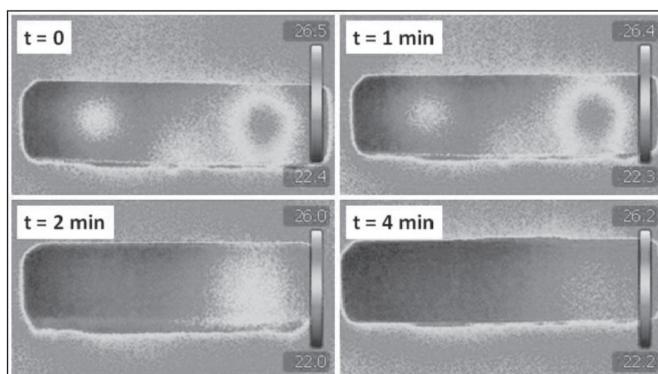


Figure 4 : Images infrarouges juste après excitation puis à 1 min, 2 min et 4 min.

On observe clairement à gauche le capteur partiellement corrodé (dont l'intensité est faible et disparaît rapidement) et le capteur sain à droite (dont l'intensité est forte et disparaît lentement). Le point chaud central sur les deux premières images correspond aux traces de doigts de l'opérateur.

Premièrement, l'intensité du point chaud correspondant au capteur partiellement corrodé est plus faible que celle du point correspondant au capteur sain. Deuxièmement, on observe que le point chaud lié au capteur partiellement cor-

rodé disparaît beaucoup plus vite que le point chaud lié au capteur sain. Les comportements statique et dynamique du point chaud lié au capteur partiellement corrodé permettent donc de le discriminer avec une grande sensibilité par rapport au capteur non corrodé.

Enfin, une série d'essais complémentaires a permis de définir la taille optimale des capteurs et la puissance de chauffe nécessaire pour obtenir une réponse exploitable (fig.5). Ces essais ont permis de trouver un compromis entre la durée d'induction nécessaire à éléver de quelques degrés un capteur sain, qui doit rester faible, et la surface du même capteur selon sa distance au parement, de l'ordre respectivement de 2 minutes et 50 cm² maximum pour les capteurs les plus éloignés (7 cm pour le plus éloigné).

3. CONCLUSION

La méthode de mesure présentée dans cet article, brevetée, consiste à utiliser les propriétés thermiques du fer métallique pour suivre un front de diffusion de CO₂ ou de chlorures dans l'enrobage d'un béton de structure, afin d'anticiper l'initiation de la corrosion des armatures. Les capteurs développés sont orphelins et ne possèdent aucune connexion avec l'extérieur. Excités par induction grâce à un champ magnétique extérieur, on a vérifié que leur échauffement est proportionnel à leur état de corrosion. Ces capteurs jouent en fait un rôle de fusibles. Grâce à leur positionnement en chevron au sein de l'enrobage, il est ainsi possible de repérer relativement bien le front de diffusion du CO₂ ou des chlorures avant que celui-ci n'atteigne les armatures du premier rang. Les essais de calibration réalisés à ce jour permettent d'utiliser ces capteurs jusqu'à une profondeur de l'ordre de 7 cm, pour une durée de mesure qui est de l'ordre de quelques minutes maximum.

Depuis 2013, une centaine de capteurs a été installée sur un ouvrage d'art exposé aux embruns marins afin de suivre le

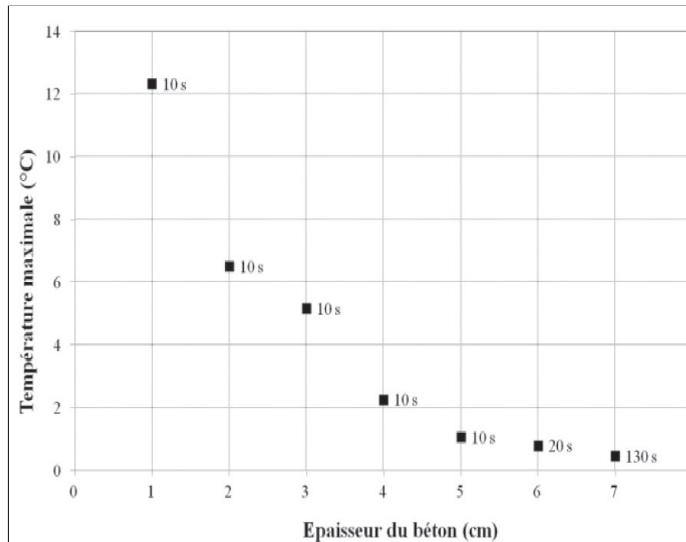


fig. 5a

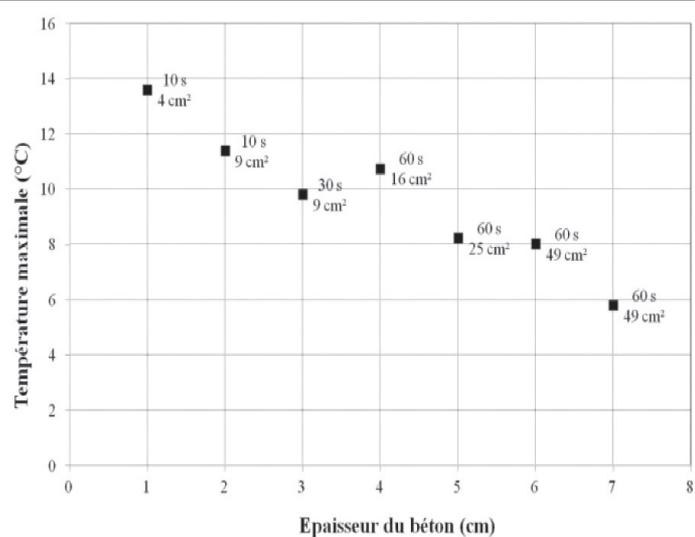


fig. 5b

Figure 5 : Exemples de réponses thermiques de capteurs sains et corrodés, pour des profondeurs variables.

Les valeurs sur chacun des points correspondent, pour la même induction :

5a : au temps d'induction, en secondes, pour une surface identique du capteur ;

5b : à la surface du capteur, en cm^2 , associée à un temps d'induction donné.

front de diffusion en milieu réel. Les mesures de suivi sont prévues au cours des années à venir et permettront de faire un retour d'expérience et d'affiner la technique si besoin est.

Les auteurs remercient M. Lopez-Rios de la société Ciprian pour sa participation active dans la mise au point de la méthode de contrôle présentée ici.

RÉFÉRENCES

- [1] Dollet A. et Taché G. 2010 : Méthodes de diagnostic du béton armé, in Anticorrosion et durabilité dans le bâtiment et le génie civil, S. Audisio et G Béranger, pp. 659-668. Presses polyt. et univ. Romandes ed.
- [2] Idrissi H., Lenain JC, Proust A., Watson J., 2010 : Détection de la corrosion des armatures de béton armé par émission acoustique, in Anticorrosion et durabilité dans le bâtiment et le génie civil, S. Audisio et G Béranger, pp. 659-668. Presses polyt. et univ. Romandes ed.
- [3] W.J. Mc Cartera, Ø. Venneslandb, 2004: Sensor systems for use in reinforced concrete structures (Review), Construction and Building Materials, 18, 20, 351-358.
- [4] Garcia V., 2013: Contribution du taux de chlorures pour l'amorçage de la corrosion des armatures du béton armé. Thèse Univ. de Toulouse 3 Paul Sabatier, LMDC.
- [5] Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton. Association française de génie civil, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, ISBN : 2-85978-405-5, 2005.
- [6] BREVET : Corrosion measuring cell. Peter Schiessl US5015355, 04/05/1991.
- [7] Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences. M. Raupach, Construction and Building Materials, Volume 10, 5, 1996, Pages 329-338.
- [8] Monitoring system for the penetration of chlorides, carbonation and the corrosion risk for the reinforcement. M. Raupach and P. Schießl, Construction and Building Materials, Volume 11, 4, 1997, Pages 207-214.
- [9] G. Busse, G. Riegert, Th. Zweschper, Eddy-current lock-in-thermography: Method and its potential, Appl. Phys. Lett. 35, 759 (1979).