

Interaction microorganismes et matériaux cimentaires en eau douce naturelle

Valentin Georges¹, Sébastien Roux², André Lecomte³, Françoise Feugeas⁴

¹ Institut Jean Lamour, Equipe Matériaux pour le Génie Civil, IUTNB, Le Montet, 54 601 Villers-lès-Nancy
valentin.georges@univ-lorraine.fr

² Institut Jean Lamour, Equipe Matériaux pour le Génie Civil, IUTNB, Le Montet, 54 601 Villers-lès-Nancy
sebastien.roux@univ-lorraine.fr

³ Institut Jean Lamour, Equipe Matériaux pour le Génie Civil, IUTNB, Le Montet, 54 601 Villers-lès-Nancy
andre.lecomte@univ-lorraine.fr

⁴ ICube UMR 7357, INSA de Strasbourg, CNRS; 24 Boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg Cedex,
France francoise.feugeas@insa-strasbourg.fr

RÉSUMÉ. CET ARTICLE TRAITÉ DE L'ACTION DES MICRO-ORGANISMES PRÉSENTS DANS UNE EAU DOUCE NATURELLE SUR DES PÂTES DE CIMENT DE DIFFÉRENTES NUANCES. LES ANALYSES DE SURFACE MONTRENT QUE LA DENSITÉ BACTÉRIENNE DES BIOFILMS RECOUVRANT LES ÉCHANTILLONS DÉPEND PEU DE LA NUANCE CIMENTAIRE OU DE LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU DES ÉCHANTILLONS. TOUTEFOIS, LES CIMENTS AU CALCAIRE PRÉSENTENT UN COMPORTEMENT DIFFÉRENT. LES OBSERVATIONS AU MEB ONT RÉVÉLÉ LA PRÉSENCE ABONDANTE DE DIATOMÉES SUR L'ENSEMBLE DES SURFACES ET QU'ELLES SONT SOUVENT RECOUVERTES D'UN ENCROUTEMENT MINÉRAL. LES FRUSTULES DE CES MICRO-ALGUES SONT DONC SUSCEPTIBLES DE RÉAGIR AVEC CERTAINS HYDRATES DES CIMENTS, EN RAISON DE LEUR NATURE SILICEUSE AMORPHE.

ABSTRACT. BIOLOGICAL COLONIZATION CEMENT PASTE EXPOSED NATURAL FRESH WATER. THIS ARTICLE IS FOCUSED ON THE ACTION OF MICRO-ORGANISMS IN NATURAL FRESH WATER ON CEMENT PASTES MADE WITH DIFFERENT CEMENT BASES. SURFACE ANALYZES SHOWED THAT THE BACTERIAL DENSITIES BIOFILMS COVERING THE SAMPLES SURFACES DO NOT HIGHLY DEPEND ON THEIR CEMENT BASE OR WATER ACCESSIBLE POROSITY. HOWEVER, LIMESTONE CEMENTS EXHIBIT DIFFERENT BEHAVIOR. THE SEM OBSERVATIONS REVEALED THE PRESENCE OF ABUNDANT DIATOMS ON ALL SURFACES AND THAT ARE OFTEN COVERED WITH A MINERAL ENCRUSTATION. FRUSTULES OF THESE MICROALGAE COULD REACT WITH SOME CEMENT HYDRATES, BECAUSE OF THE AMORPHOUS SILICEOUS NATURE..

MOTS-CLÉS : Biodétérioration, pâtes de ciment, eau de Moselle, colonisation bactérienne, diatomées.

KEY WORDS: Biodeterioration, cement paste, fresh water, bacterial colonization, diatoms.

De nombreux ouvrages réalisés avec des bétons hydrauliques sont en contact avec une eau douce naturelle ou une eau de mer. De ce fait, ils sont soumis à des processus de vieillissement différents en intensité, nature et fréquence de ceux classiquement rencontrés en milieu aérien. Les microorganismes présents dans ces milieux aqueux sont souvent impliqués dans les dégradations observées. Le cas mieux connu de dégradation bio-induite est celui des réseaux d'assainissement en béton dont la ruine est notamment due à l'acide sulfurique sécrété par la flore microbienne en présence d'effluents riches en matières organiques et en sulfates [YUA 15] [MON 01]. Cette pathologie spectaculaire est explorée et étudiée depuis 1945.

En revanche, à ce jour, peu de recherches se sont intéressées aux actions des microorganismes sur les bétons immergés en milieu naturel. À l'exception des encrassements biologiques sur le parement des ouvrages, la multitude de facteurs impliqués dans la dégradation de ces ouvrages ne permet d'isoler l'action des microorganismes dans ces environnements ouverts. Néanmoins l'étude de ces phénomènes n'est pas dénuée d'intérêt car ils s'inscrivent dans le cadre général de la durabilité des matériaux cimentaires.

L'étude présentée ici s'intéresse au comportement d'échantillons cimentaires mis en présence de la flore microbienne de l'eau de la Moselle (eau douce naturelle). Afin de distinguer les phénomènes observés, d'établir des corrélations, d'identifier les microorganismes actifs et d'approcher les mécanismes, les essais ont été effectués à deux échelles :

- en milieu naturel, pour A.M.P.H. n° 5, Idem, n° 2017a-fb2-10/c1236 (2018) évolutions physico-chimiques au cours des cycles climatiques. Des échantillons ont été placés dans des paniers en tôle d'acier inoxydable perforés, en amont du barrage de Méréville (réserve d'eau de l'agglomération nancéenne), à 2 mètres de profondeur, pour une durée de 2 ans, à partir de mai 2015.
- en laboratoire, afin d'accélérer le développement de certains micro-organismes prélevés dans l'eau naturelle (recours à des milieux de cultures spécifiques) et de maîtriser les facteurs environnementaux. Deux familles de microorganismes ont été distinguées séparément : les bactéries et les diatomées.

Préalablement aux essais, l'étude physico-chimique de l'eau de la Moselle a été réalisée à partir d'analyses mensuelles effectuées par la Métropole du Grand Nancy. En complément, des mesures ponctuelles (pH, oxygène dissout, potentiel redox, température, etc.) ont été réalisées sur le site d'immersion à différentes profondeurs. L'ensemble forme une base de données permettant de caractériser les conditions du développement bactérien.

Les échantillons utilisés sont des pâtes pures de ciment formulées avec un rapport massique eau/ciment (E/C) constant de 0,4. Des ciments de quatre nuances (CEMI, II, III et V) et de deux origines différentes (notée α et β) ont été utilisés. Les échantillons ont été fabriqués en se basant sur la norme EN 196-3 coulés dans des moules rectangulaires spécifiques en bois bakélinisé de dimensions 300 x 45 x 20 mm³, démoulés à 24 heures. Après démoulage, les échantillons ont été conservés dans des conditions de cure normalisées : 28 jours sous eau à 20°C \pm 1°C.

Tous les deux mois, le dénombrement des bactéries cultivables présentes dans le biofilms recouvrant les échantillons placés en milieu naturel a été réalisé par culture en boîtes de Pétri, après mise en solution des microorganismes dans de l'eau stérile par ultrasons. Ce suivi a permis de mettre en évidence l'importante colonisation bactérienne de la surface des échantillons dès 2 mois d'exposition (Figure 1). La densité microbienne décroît ensuite au cours des 10 mois suivants, puis augmente jusqu'au 18ème mois, terme des observations actuelles. Ces variations concernent la plupart des nuances et semble être liées aux évolutions de la température et du débit du cours d'eau [ROU 08] [PRE 03]. Les échantillons composés de ciments au calcaire (CEM II) présentent un comportement spécifique. En effet, contrairement aux autres nuances cimentaires, la densité de population bactérienne à leur surface est faible après 2 mois d'exposition (4 000 U/cm² contre 10 000 à 13 000 U/cm² pour les autres ciments) et ne présente pas de diminution significative avec le temps.

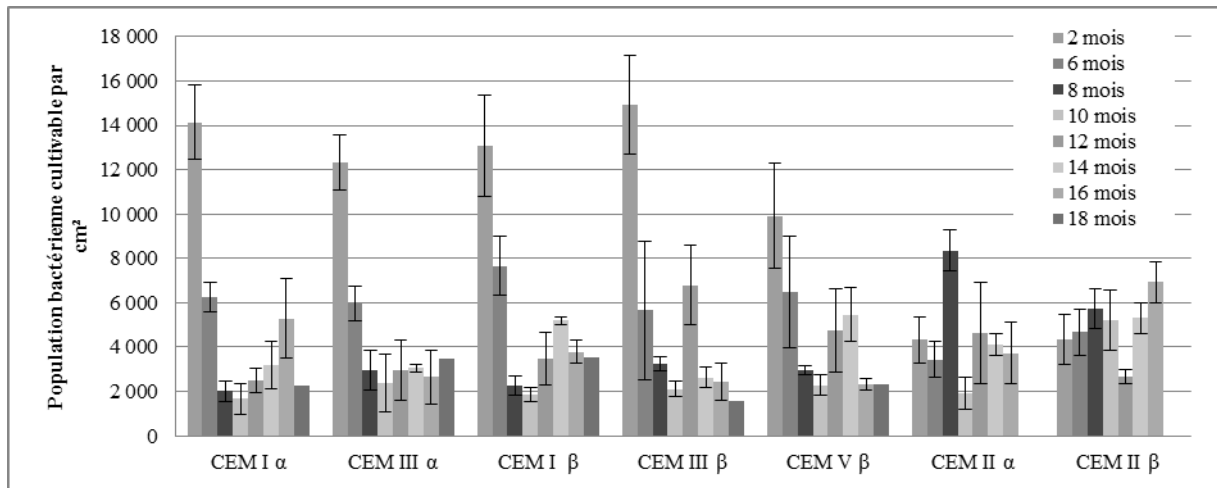


Figure 1 : Population bactérienne globale cultivable en fonction de la durée d'exposition et de la nature cimentaire

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de la surface de ces échantillons (Figure 2, CEM I β à titre d'exemple) révèle que les phases telles que la Portlandite et l'ettringite présentes avant immersion disparaissent rapidement et que seules la calcite et le quartz subsistent. Aucune autre phase pouvant être directement associée à l'activité métabolique des microorganismes n'apparaît ou ne disparaît au fil du temps. Cette analyse est également valable pour les autres nuances cimentaires après 12 mois d'immersion.

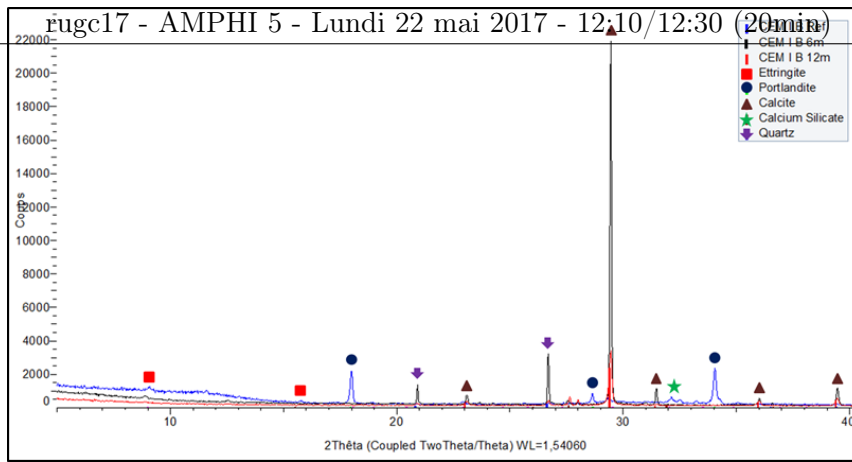


Figure 2 : Diffractogrammes X de surface effectués sur les échantillons de pâte de ciment à base de CEM I β , pour différents temps d'expositions.

Par ailleurs, l'observation de ces échantillons en microscopie électronique à pression contrôlée a révélé la présence de diatomées (Figure 4, zone 2), dont certaines sont localement recouvertes de produits cristallisés et/ou organo-minéraux (Figure 4, zone 1). Très peu de bactéries ont pu être observées.

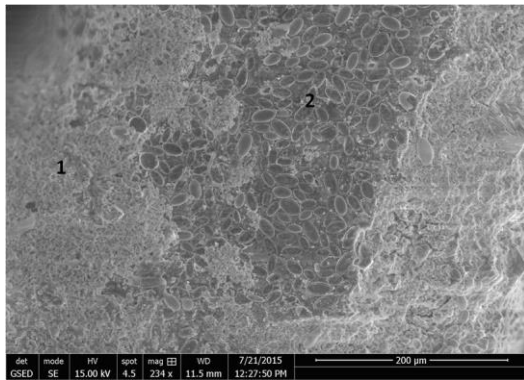


Figure 4 : Echantillon de CEM I plongé 2 mois dans la Moselle. Présence massive de diatomées

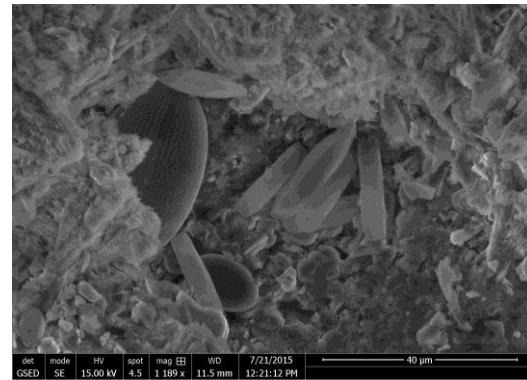


Figure 5 : Echantillon de CEM I plongé 2 mois dans la Moselle. Détail

A notre connaissance, aucune recherche ne fait encore état d'un rôle particulier des diatomées dans les phénomènes de vieillissement des bétons. La composition vitreuse de leur frustules les rend cependant potentiellement réactives vis-à-vis de la chaux générée par le ciment notamment. Selon sa composition et sa structure poreuse, le dépôt minéral recouvrant localement les diatomées (Figure 5) peut alors avoir un rôle bénéfique ou néfaste vis-à-vis de la durabilité du matériau.

Pour étudier ce phénomène, des échantillons de pâtes ont été immergés dans un milieu de culture de laboratoire favorisant le développement des diatomées (milieu de Brunel-Delchaux et Guerri), en veillant à respecter les conditions environnementales nécessaires à leur métabolisme (source lumineuse recréant le spectre de la lumière naturelle selon un cycle jour/nuit de 12h, bullage continu pour assurer l'apport de dioxyde de carbone et d'oxygène).

Après un mois de culture, des différences notables de densité de morphologie de diatomées ont pu être observées (MEB) notamment en fonction de la nuance cimentaire (Figure 6). Ces densités ont été évaluées par comptage visuel et exprimées en unités par mm^2 (U/mm^2). Ce suivi a permis de mettre en évidence l'importante colonisation de la surface des échantillons par les diatomées, principalement pour les échantillons à base de CEM I et de CEM III, environ 10 000 unités par millimètre carré, alors que les échantillons formulés avec un CEM II ou un CEM V présentent une colonisation plus faible avec respectivement un ratio de 2 et 10 par rapport aux deux autres nuances. L'exploitation des analyses de spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) réalisées sur la surface de ces échantillons viennent étayer les observations précédentes, en effet le rapport de l'intensité (nombre de coups par seconds) du pic de silicium à celle du pic du calcium est généralement corrélé à la densité de

diatomées visibles en surface ACOPHIE pour les échantillons 2017 situés à l'analyse 30 (DRX) de la surface de ces échantillons, ne permet que l'identification de la calcite.

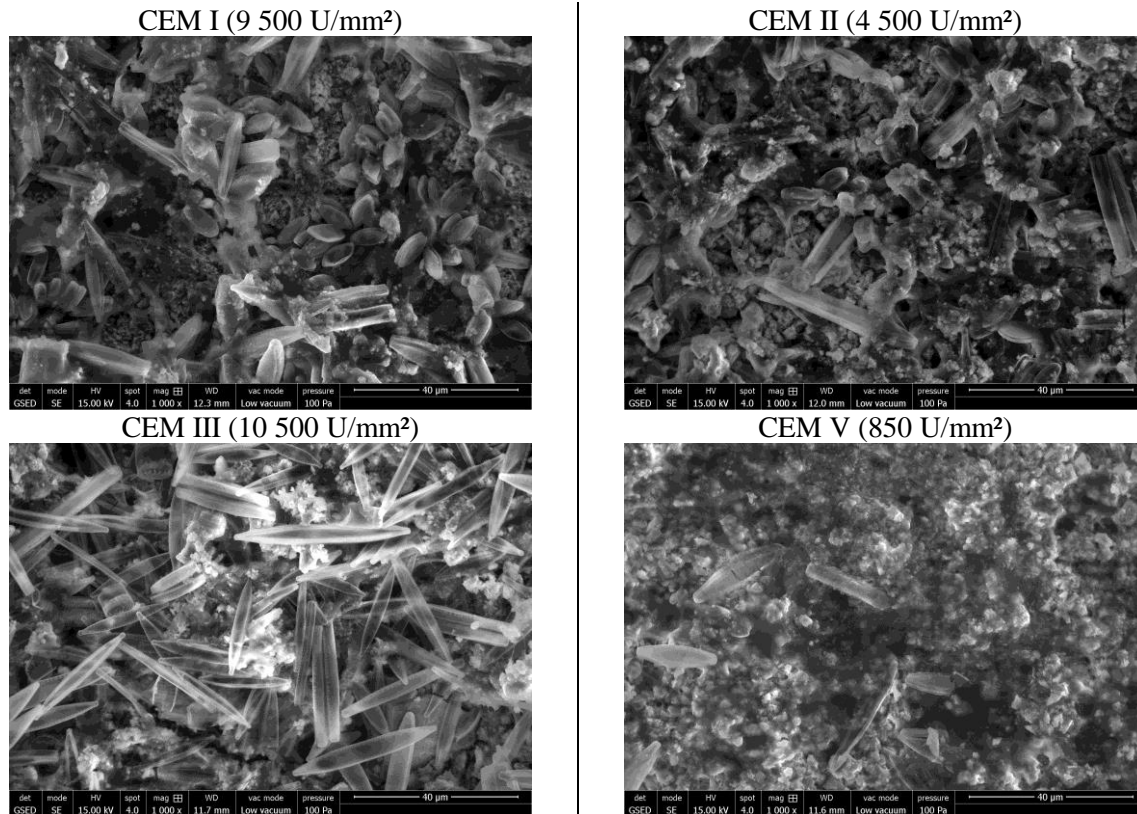


Figure 6 : Image MEB-PC d'échantillon exposé 1 mois dans le milieu de culture diatomée

A ce stade de l'étude de la colonisation et de l'influence des micro-organismes présents dans une eau douce naturelle sur différents pâtes de ciments, les principales conclusions pouvant être établies sont :

- la colonisation de la surface des échantillons par des micro-organismes (bactéries et diatomées) est effective quelle que soit la nuance cimentaire considérée,
- une diminution importante de la densité de colonisation bactérienne apparaît durant les 10 premiers mois d'études suivi d'une augmentation modérée en période estivale. Cette variation dépend fortement de l'action combinée de la variation du débit et de la température,
- les ciments au calcaire (CEM II) présentent une bioréceptivité plus faible que les autres ciments,
- des diatomées colonisent la surface des échantillons avec des densités variables en fonction de la nuance cimentaire,
- un encroûtement secondaire, riche en silicium, recouvre partiellement ou totalement les diatomées dans le milieux naturel mais pas en laboratoire.

Bibliographie

- [MON 01] Monteny J., De Belie N., Vincke E., Verstraete W., Taerwe L., « Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete», *Cement and Concrete Research*, vol.31, 2001, p. 1359-1365.
- [PRE 03] Prescott L.M., Harley J.P., Klein D.A., *Microbiologie*, Editions De Boeck, 2003.
- [ROU 08] Roux S., Évaluation des risques de biodégradation des bétons en contact avec une eau douce naturelle, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2008.
- [YUA 15] H. Yuan, P. Dangla, P. Chatellier, T. Chaussadent, « Degradation modeling of concrete submitted to biogenic acid attack», *Cement and Concrete Research*, vol. 70, 2015, p. 29-38.