

Lettre d'information du lerm n° 36 : l'extraction des sels

Posted on [24 janvier 2018](#) Author [Philippe Souchu](#) [Edit](#)



N° 36, décembre 2017 – La lecture de cette lettre est optimale avec Chrome ou Fire Fox

Editorial



Nous avons abordé à plusieurs reprises dans notre lettre d'information la question de l'action délétère des sels sur ou plutôt dans les matrices minérales [\(1\)](#). En effet, l'eau les entraîne en solution au sein des matériaux poreux dans lesquels se produisent alors des mécanismes chimiques de précipitation et de cristallisation, générateurs de désordres qui, au fil du temps, s'amplifieront.

Le dessalement permet ainsi d'arrêter ou de freiner l'évolution de ces désordres. Une simple douche comme celle que nous prenons en quittant la plage pour nous rincer n'y suffit pas car les sels, dissouts et véhiculés par l'eau, pénètrent la structure la plus intime des matériaux poreux. Le dessalement n'est donc pas un simple rinçage, mais bien une opération technique d'extraction.

C'est à ces techniques de dessalement ou de déchloration que va s'intéresser cette lettre d'information, non sans un rappel préalable de l'action des sels, à la fois sur la pierre et sur le béton, pour bien saisir tout l'enjeu de ces techniques.

Toute l'équipe du lerm vous souhaite une excellent nouvelle année et espère qu'elle ne manquera pas de sel... à l'issue de cette lecture !

Très cordialement,

Bernard Quénéé, directeur général délégué
Philippe Souchu, rédacteur en chef

(1) Voir nos articles :

[Les chlorures dans la construction](#)

[L'altération du béton en zone de marnage](#)

[Couvent des Jacobins à Toulouse : problématique de sels solubles, remplacement ou traitement des briques ?](#)

Dossiers techniques



[Les sels dans les matériaux poreux. La dégradation des matériaux poreux par les sels est commandée par le comportement du système sels-eau, comportement lui-même dicté par le transport de l'eau au sein du substrat...](#)



[La dégradation des pierres par les sels. La détérioration des matériaux poreux par les sels est généralement expliquée par la théorie de la pression de cristallisation...](#)



[Entretien avec Luc Pelletier de l'atelier Tollis sur le dessalement des pierres...](#)



[La dégradation des bétons par les chlorures...](#)



[Entretien avec Xavier Hallopeau, expert corrosion et protection cathodique de la Société Freyssinet sur la déchloration des bétons...](#)

Portrait



[Portrait de Manon Becchis, chimiste au lerm : « Je suis venue à la chimie en ne faisant pas de cuisine !... »](#)

LERM-Infos



Directeur de la publication : [Bernard Quénéé](#)

Rédacteur en chef : [Philippe Souchu](#)

Les sels dans les matériaux poreux

Posted on [15 janvier 2018](#) Author [Philippe Souchu](#)

Une histoire d'eau, de sels et de pores

Un matériau poreux est un milieu hétérogène où sont associées 3 phases : une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse.

C'est en solution que les sels peuvent pénétrer au sein d'un tel matériau (sur ce sujet voir [notre article la molécule d'eau](#) et notamment le paragraphe sur l'eau comme solvant). La dégradation des matériaux poreux par les sels est donc commandée par le comportement du système sels-eau, comportement lui-même dicté par le transport de l'eau au sein du substrat poreux.

L'eau pénètre un matériau poreux soit sous forme liquide soit sous forme vapeur. Liquide, l'eau s'y déplace soit par capillarité soit par infiltration : par capillarité, l'eau se déplace vers les zones où son énergie libre est la plus basse ; par infiltration, l'eau se déplace sous l'effet de la gravité.

L'eau vapeur, elle, pénètre le substrat poreux soit par condensation à la surface ou à l'intérieur du substrat, soit par hygroscopicité (absorption ou adsorption des molécules d'eau).

Nature des sels

La majorité des sels résulte de la combinaison de cinq anions : CO_3^{2-} (carbonate), SO_4^{2-} (sulfate), Cl^- (chlorure), NO_3^- (nitrate) et $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ (oxalate) et cinq cations : Na^+ (sodium), K^+ (potassium), Ca^{2+} (calcium), Mg^{2+} (magnésium) et NH_4^+ (ammonium).

Transport d'eau au sein du substrat poreux

Si le matériau poreux contient en quantité suffisante de l'eau sous état liquide pour que son réseau poreux soit interconnecté, l'eau se transportera majoritairement par capillarité sous l'influence d'un gradient de teneur en eau. Si le matériau n'est que partiellement saturé, l'eau se transportera sous forme vapeur par diffusion.



Ce transport d'eau véhicule au sein du substrat les sels qui y sont dissous sous forme d'ions. Le transport d'ions s'effectue lui-même par advection (il s'agit en fait du mouvement de l'eau elle-même) ou par diffusion : la diffusion des ions correspond au mouvement des ions sous l'effet d'un gradient de concentration ionique. La diffusion est un phénomène qui tend à égaliser la concentration des ions en tout point d'une solution.

Le séchage est un évènement qui correspond à la diminution de la teneur en eau du substrat par le transfert de l'eau vers l'air ambiant.

Solubilité

La **solubilité** est la quantité maximale de produit que l'on peut dissoudre à une température déterminée dans une quantité de solvant donnée. Cette quantité varie avec la température. Le produit de solubilité permet de classer les composés en fonction de leur concentration limite de **précipitation**. Plus ce produit est faible, moins la substance est soluble.

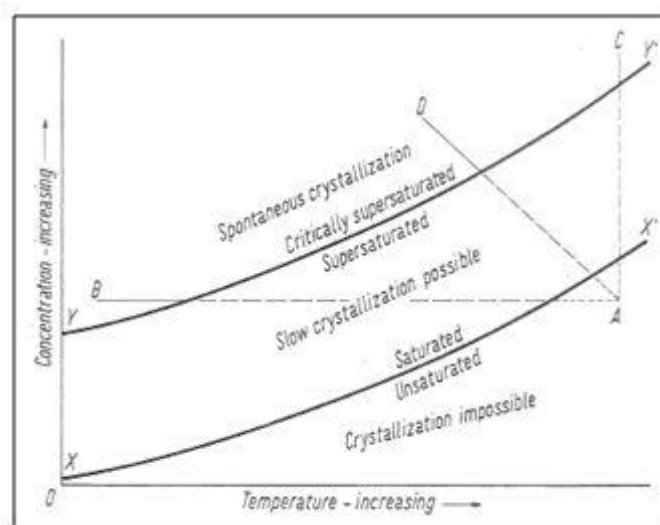
La solubilité des sels est donc variable : 360 g de NaCl (sel de table) peuvent être dissous dans un litre d'eau, mais seulement 2 g de CaSO₄ (gypse). Lors de l'évaporation d'une solution, les sels les moins solubles précipitent d'abord. Ainsi, dans une remontée capillaire, les sels les moins solubles précipitent le plus tôt, c'est-à-dire au point le plus bas, soit au plus près de la source d'humidité. La séquence classiquement observée verra se déposer dans l'ordre, depuis le bas vers le haut, les carbonates, les sulfates, puis les chlorures, bien que la réserve disponible en ions alcalins notamment puisse redéfinir l'ordre de précipitation des sels selon les concentrations résiduelles au fil de l'ascension capillaire des solutions. A noter également le rôle des interventions microbiologiques dans ces processus de cristallisation.

Précipitation et cristallisation des sels

Dans une solution aqueuse de chlorure de sodium, par exemple, à partir d'une certaine quantité de sel et à température constante, le sel ne se dissout plus. La solution est alors dite saturée. S'il arrive que cette solution contienne plus de soluté qu'elle ne peut en dissoudre normalement, le seuil de sursaturation est atteint. La précipitation peut être considérée comme le phénomène inverse de la dissolution : ainsi, l'évaporation provoque une diminution du volume de solvant, volume dont la concentration en solutés augmente donc. Quand cette concentration dépasse la solubilité des solutés, le seuil de sursaturation est atteint et les solutés précipitent.

La plupart des sels ont une solubilité qui croît avec la température. Si une solution se refroidit, alors leur solubilité diminue. Une solution à saturation passera alors en situation de sursaturation et la précipitation des sels deviendra possible.

La sursaturation peut donc être considérée comme la force motrice du processus de cristallisation.



Courbe de concentration en fonction de la température. La sursaturation peut être obtenue par refroidissement (A-B) par augmentation de la concentration (A-C), par combinaison des deux (A-D).

in Winkler, 1973, Stone : Properties, Durability in Man's Environment

Categories

[Chlorures](#), [Pierre](#), [Sel](#)

Tags [chlorures](#), [cristallisation des sels](#), [eau](#), [précipitation](#), [Sel](#), [solubilité](#), [sursaturation](#), [transport](#)

La dégradation des pierres par les sels

Posted on [15 janvier 2018](#) Author [Philippe Souchu](#)

Les mécanismes de dégradation des pierres par les sels sont encore à éclaircir et font toujours l'objet de débats. La détérioration des matériaux poreux par les sels est généralement expliquée par la théorie de la pression de cristallisation : la croissance des cristaux de sel à l'intérieur du réseau poreux endommage le matériau lorsque la pression exercée excède la résistance à la traction de ce dernier.

Les limites de cette théorie tiennent notamment au fait qu'elle n'explique pas que tous les sels n'aient pas les mêmes effets destructeurs.

D'autres mécanismes liés à la cristallisation des sels sont également explorés : la dilatation hydrique différentielle et la dilatation thermique différentielle (entre les sels et le substrat).

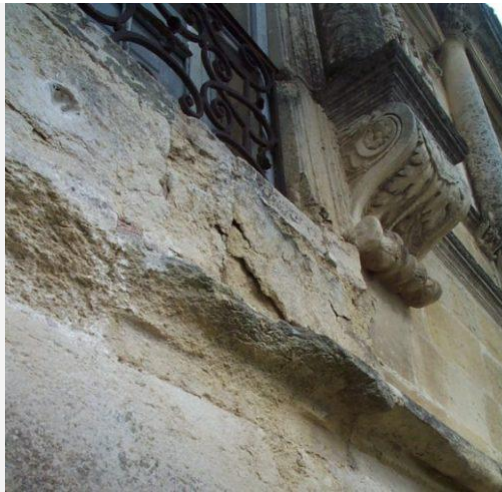


Il est admis aujourd'hui qu'il existe une synergie entre la présence de sels et d'autres facteurs de dégradation : la présence de sels amplifie le développement des argiles de par leur humidité piégée ainsi que les effets du gel.

Enfin, en général, la résistance des matériaux diminue lorsqu'ils sont saturés d'eau. L'action de cristallisation des sels peut donc être d'autant plus destructive que le matériau est imbibé de solution saline.

Nature des dégradations provoquées par les sels

Quand la cristallisation des sels se produit à l'intérieur du réseau poreux, elle y génère des fissures et des desquamations (écailles détachables plus ou moins grandes). La cristallisation en surface provoque des efflorescences en surface moins dangereuses pour le matériau.



Desquamation par plaques



Efflorescence de surface

Cas particulier des sels hygroscopiques

Ces sels sont cristallisés au dessous d'un taux donné d'humidité dans l'air et passent en solution dès qu'il devient plus humide. Très sensibles aux variations de température et d'humidité, ils alternent des cycles rapides d'efflorescence et de solution à la surface du matériau provoquant une altération superficielle de la pierre qui la rend vulnérable à d'autres agressions.

Pour aller plus loin

[Entretien avec Julie Désarnaux](#) sur la dégradation des pierres par les sels:

Julie est l'auteur d'une thèse qui remet en cause l'hypothèse, largement admise, de la dégradation des matériaux poreux par la pression de cristallisation des sels exercée dans les pores. C'est l'occasion de faire un peu l'histoire de cette hypothèse, d'entrer dans l'intimité de la croissance cristalline et d'un questionnement scientifique critique...

Categories

[Chlorures](#), [Dégradation de la pierre](#), [Patrimoine bâti](#)

Tags

[cristallisation des sels](#), [dégradation de la pierre](#), [efflorescence](#)

Entretien sur l'extraction des sels avec Luc Pelletier, directeur de l'Atelier Tollis

Author [Philippe Souchu](#) [Edit](#)



Pouvez-vous, Monsieur Pelletier, nous présenter votre entreprise ?

Tollis, que je dirige depuis 2004, est un atelier de restauration d'œuvres du groupe Aurige. Nous intervenons en restauration-conservation sur plusieurs domaines connexes : la pierre de taille, les décors peints monumentaux, la gypserie, la mosaïque, le marbre et les métaux.

Pour ce qui concerne la pierre, nous pratiquons la restauration et la sculpture d'œuvres. Cette activité nous a conduits à constituer un bureau d'études qui se consacre à la pathologie de la pierre, ce qui nous permet d'intervenir comme sapiteur auprès d'experts et comme acteurs en réparation de sinistres. Dans ce domaine de la pierre, nous sommes également rattrapés par la problématique du plomb, notamment dans la restauration des édifices parisiens, et nous avons donc mis en place des méthodes de déplombage.

Pour en venir à la question de l'extraction des sels qui nous intéresse, cette extraction est-elle toujours une nécessité ?

Tout dépend de la problématique rencontrée. Certains parements sont fort bien conservés avec des teneurs en sels élevées. Les situations sont toujours complexes car les paramètres sont multiples : nature du substrat, exposition, nature des sels, historique des restaurations... L'essentiel est de ne pas rompre l'équilibre qui s'est constitué.

Il reste cependant certain qu'un diagnostic préalable à toute intervention est nécessaire pour comprendre clairement la nature, les mécanismes et les niveaux de pollution par les sels. Ce diagnostic passe, entre autres, par des prélèvements qui permettent l'analyse du support en laboratoire. On voit trop, à Paris par exemple, de restaurations et de consolidations imprudentes qui se sont faites sans ce diagnostic et sans dessalement préalables, opérations dont le résultat est une accélération de la pathologie qui provoque des desquamations sévères des parements.

Le dessalement quand il est pratiqué n'est pas nécessairement complet. Pour la conservation du matériau, il n'est en effet souvent ni nécessaire, ni même souhaitable, de descendre sous le seuil de concentration défini par les travaux du LRMH [\(1\)](#). A cette fin, nous effectuons des

prélèvements en zone saine et en zone altérée et définissons le seuil à partir duquel la concentration devient nuisible.

Pour optimiser le diagnostic, nous avons d'ailleurs mis au point un petit appareil de mesure de turbidité qui nous permet une première approche du chantier et dont les résultats déclenchent une campagne d'investigations plus poussées, si nécessaire, sur telle ou telle zone.

Notre expérience nous montre que la bonne pratique qu'est la cartographie de la salinité du parement préalable à toute intervention n'est pas encore uniformément répandue en France.

Une fois le diagnostic fait, quelle solution adoptez-vous ?

La solution, c'est la compresse... mais il n'y a pas de solution unique, car les supports sont différents et les sels sont différents. De plus, un même sel peut se comporter différemment en fonction du support et sur un même support en fonction de son exposition. Nous recherchons donc la formulation de compresse adaptée à chaque cas spécifique. Pour notre part, nous n'utilisons donc pas les compresses industrielles disponibles : moyennes partout, elles ne sont optimales ni pour l'efficacité du traitement, ni en termes économiques parce qu'elles amènent à multiplier le nombre de passes.



Vous travaillez donc spécifiquement sur les compresses...

C'est une nécessité pour nous. Quelle échelle commune y a-t-il entre la porosimétrie d'un tuffeau de 4 microns et celle d'une pierre de Saint-Maximin de 18 ou 19 microns ? La définition de la structure poreuse de la compresse est essentielle, car l'advection, qui est en quelque sorte le

moteur du dessalement, est liée à la relation adaptée entre la porosité du support et celle de la compresse.

Quelle est la composition d'une compresse ?

Il s'agit de cellulose, de poudre de marbre ou de sable à granulométrie contrôlée, du type des sables de mortier de résine et d'argile dont le type dépend des besoins du chantier de dessalement. Cette composition reste assez empirique : si la porosimétrie mercure d'une pierre est aisée à faire, la composition adéquate de la compresse n'est pas donnée d'un coup ; nous procédons donc par essais progressifs d'adaptation.

Nous travaillons également particulièrement la maniabilité : nous devons en effet bien maîtriser l'épaisseur de la compresse, maîtrise qui ne s'obtient qu'au moyen d'une projection mécanique.

Pourquoi cette nécessité d'une épaisseur homogène ?

Nous avons constaté que les variations d'épaisseurs impliquent des mobilisations différentielles de sels qui aboutissent à la formation d'auréoles. Le contrôle de l'épaisseur de la compresse est donc un garant de la qualité du rendu esthétique. Dans tous les cas, un dessalement mal commencé est rarement rattrapé car il est difficile, ensuite, d'abaisser les concentrations salines.



Comment en êtes vous venus à cette réflexion sur la nature et la qualité des compresses ?

Au début de notre activité, nous avons mis au point un système de nettoyage des parements qui était séduisant, mais dont l'effet induit était qu'il mobilisait les sels solubles par humidification et les faisait migrer par diffusion. Il y a donc un rapport entre nettoyage et dessalement. Nous avons

ensuite constaté les propriétés advectives d'une laine de roche projetée sur un parement et serrée par talochage.

C'est à cette même époque, dans les années 2007 – 2008, que le LRMH sous l'impulsion des travaux de Véronique Vergès – Belmin, introduit en France les compressees utilisées en Italie, sur le chantier de l'église Saint-Philibert à Dijon, notamment, sous la direction d'Eric Pallot. Chantier qui servira ensuite assez largement de champ d'expérimentation pour le dessalement par compressees.



Pouvez-vous nous décrire un peu ce chantier ?

Volontiers et d'autant plus qu'il est assez emblématique du problème que pose les sels. Cette église date du 12e siècle. A la révolution, elle sert de grenier à sel. En 1972, on y installe du chauffage sur une dalle de béton. Les désordres consécutifs sont spectaculaires : les remontées d'humidité chargées de sels s'effectuent alors sur les piliers qui servent de mèches. Lorsqu'on rentre dans l'église, ils semblent être rongés par des castors géants.

Le dessalement n'a de sens que si l'on tarit la source génératrice de la migration saline. La décision est donc prise de réaliser une barrière étanche assez audacieuse : on découpe une saignée à la base des piliers au moyen d'un fil diamanté. A l'avancement de la découpe, on introduit des lames d'inox de 1 cm d'épaisseur qui d'une part assurent le calage et dispensent de l'étalement et d'autre part, participent à l'étanchéité. Après le découpage complet de la base des piliers, une résine époxy a été injectée pour empêcher les remontées capillaires.

L'extraction des sels par compressees est donc maintenant une technique éprouvée ?

Oui, cette technique permet un dessalement efficace dans la limite des seuils tolérables que nous avons évoqués et l'étude préalable permet d'adapter au plus juste la structure poreuse de la compresse à celle du substrat pour créer une advection efficace. L'humidification qu'on pratiquait auparavant n'est plus nécessaire car l'humidité de la compresse est suffisante, ce qui permet de

modérer la mobilisation non souhaitée des sels. Enfin il convient de rappeler que la qualité du dessalement étant dépendante des conditions d'exposition du parement (ensoleillement ou vent), des moyens de contrôle de l'assèchement doivent être prévus. Pour terminer, la rapidité des passes successives est également un élément clé de la réussite.

Pour ouvrir les perspectives, je rappellerais volontiers que la première opération de dessalement, c'est le nettoyage. Ainsi, la problématique de déplombage des pierres du Louvre nous a amenés à concevoir des compresses dont l'advection tend elle-même vers le nettoyage : elles incorporent trois argiles différentes dont les séchages progressifs agissent comme autant de tuilage dans le temps pour l'extraction et le piégeage des particules de plomb.

L'étude SCOST (Salt Compatibility of Surface Treatment) menée par le LRMH entre dans le cadre d'un programme européen sur la compatibilité de traitements avec des pierres contaminées par des sels. Réalisée en 1999-2001 en collaboration avec le Polytechnico de Milan, l'IRPA, et coordonnée par TNO (Pays-Bas), elle avait pour but de déterminer des seuils de teneurs acceptables en sels solubles pour un traitement hydrofuge en fonction des caractéristiques des pierres.

Miquel A., Bromblet P, Vergès-Belmin V., Binda L., Baronio G.E., De Witte E., De Clercq H., Van Hees R., Broken H.,

« Experiment on the compatibility of apolysiloxanic treatment with substrates loaded with sodium sulphate: influence of the physical properties of the substrates on the salt content limit », in Proceedings of the Third International Conference on surface technology with water repellent agents, Hydrophobe III, Hanovre, 25-26 septembre 1995, Université d'Hanovre, Allemagne, Aredificatio Publishers GmbH, Fribourg, 2001, p. 203-217.

On en trouve également un résumé dans la revue Monumental de 2002. ([retour](#))

Categories [Chlorures](#), [Dégradation de la pierre](#), [Sel](#)

Tags [dégradation de la pierre](#), [dessalement par compresse](#), [extraction du sel](#)

La dégradation des bétons par les chlorures

Posted on 15 janvier 2018 Author Philippe Souchu



Exemple de l'eau de mer

L'attaque des matrices cimentaires par l'eau de mer combine des agressions de nature différentes menées par les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique, auxquelles s'ajoutent, selon la situation de l'ouvrage, les effets délétères des cycles d'humidification-séchage et l'agression physique des vagues en zone de marnage. A l'agression physico-chimique que subit la matrice s'ajoutent, en outre, les dommages liés à la corrosion des armatures.

Le phénomène est donc très complexe. Dans le cadre de cette lettre d'information consacrée au chlore, nous n'aborderons que l'action du chlorure de sodium et du chlorure de magnésium.

Chlorure de sodium

L'action du chlorure de sodium sur la matrice cimentaire est double :

1- Consommation des ions calcium de la portlandite et des C-S-H, par formation

de chlorure de calcium soluble : $\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{NaCl} \leftrightarrow \text{CaCl}_2 + 2\text{NaOH}$

2- Formation de monochloroaluminate de calcium $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, par réaction des chlorures avec l'aluminate tricalcique C_3A

et les aluminates hydratés : $\text{CA}_3 + \text{CaCl}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

Cette réaction, qui consomme des chlorures, permet de réduire le taux d'ions libres, ce qui retarde le risque de corrosion des aciers.

Mais cette protection peut être déstabilisée par une action sulfatique associée qui, réagissant avec le monochloroaluminate de calcium, peut produire de l'ettringite susceptible de produire une expansion. Dans les zones d'aspersion et de marnage, à côté de l'action chimique sur la matrice cimentaire, les cycles de dissolution-cristallisation du chlorure de sodium, peuvent mener à des pressions de cristallisation qui provoquent un écaillage de surface. Il s'agit d'un phénomène de lixiviation de la chaux qui accroît la porosité du béton.

Chlorure de magnésium

Comme le chlorure de sodium ce sel exerce une action dissolvante sur la chaux. Mais le gel alors en solution conduit à la formation de brucite (Mg(OH)_2) :



qui, précipitée à la surface du béton, peut ralentir la pénétration des ions agressifs dans le béton. Comme pour le chlorure de sodium, la réaction du chlorure de magnésium avec les aluminates provoque la formation de monochloroaluminate de calcium.

Enfin, il est bon de signaler un phénomène fréquent de substitution ionique pouvant accompagner ce type de réactions en milieu marin, à savoir la substitution du calcium des C-S-H par le magnésium, donnant naissance à des M-S-H moins compacts et résistants.

Au-delà du cas des chlorures, la durabilité des bétons en milieu marin



La durabilité des bétons en milieu marin est optimisée par le concours de trois paramètres :

- une compacité qui réduit la perméabilité et la diffusivité
- une teneur limitée en C3A précisée par la norme NF P 15-317 qui spécifie les caractéristiques des ciments pour les travaux à la mer
- des ajouts d'additions minérales permettant de réduire la teneur potentielle en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Portlandite) : cendres volantes, pouzzolanes, laitier de haut fourneau.

Voir aussi sur ce sujet notre article :

[Les réponses à l'agression maritime : un béton compact au ciment adapté](#)

Voir aussi, sur ce sujet, notre article :

[La corrosion des armatures danger majeur pour la durabilité des ouvrages en béton armé](#)

Entretien avec Xavier Hallopeau, expert corrosion et protection cathodique, Société Freyssinet

Posted on 15 janvier 2018 Author Philippe Souchu



Monsieur Hallopeau, vous êtes expert corrosion et protection cathodique chez Freyssinet, pouvez-vous nous expliquer le principe du traitement électrochimique du béton ?

Volontiers, mais, auparavant, un rapide rappel des pathologies auxquelles peuvent s'appliquer un traitement électrochimique nous permettra de comprendre les enjeux de ces traitements et nous introduira aux principes de leur fonctionnement et de leur mise en œuvre.

C'est de bonne méthode... Allons-y !

Les traitements électrochimiques s'appliquent aux bétons armés lorsque la corrosion des armatures est à craindre ou à réparer suite notamment à deux pathologies la carbonatation du béton d'enrobage et/ou la pénétration des ions chlorures (dans les deux cas jusqu'à la profondeur des armatures).

La carbonatation est inéluctable dans le temps. Son vecteur est le CO₂ de l'air qui réagit avec les hydrates du béton formant un front d'avancement. Lors de cette réaction, l'alcalinité diminue, le pH initial du béton voisin de 13 devient égal à 9 et les armatures peuvent alors se corroder de manière généralisée.

Les ions chlorures proviennent essentiellement des atmosphères marines ou des sels de déverglaçage en ville et en montagne et conduisent à une corrosion localisée des armatures que l'on appelle également piqûres.

Lorsque les armatures se retrouvent dans un béton contaminé de manière non uniforme, elles peuvent se corroder dans certaines conditions et cela nécessite de l'eau et de l'oxygène.

Les produits de corrosion du fer qui se forment ont des incidences sur la structure : perte de section de l'acier, diminution de l'adhérence acier/béton et fissuration du béton d'enrobage (voire épaufrure). La corrosion des aciers du béton armé présente un risque structurel pour l'ouvrage (diminution de capacité portante) mais également un risque à l'usager en cas de chute de débris de béton.

Que peuvent apporter les traitements électrochimiques pour des bétons ainsi atteints ?

Les traitements électrochimiques sont spécifiques de chacune des pathologies.

Le traitement de réalcalinisation consiste à remonter l'alcalinité du béton à l'interface armature/béton pour diminuer sensiblement la réaction de corrosion.

Le traitement d'extraction des ions chlorures, a, lui, pour objectif d'extraire les ions chlorure du béton d'enrobage pour diminuer le risque de corrosion des armatures.

Pour des structures fortement exposées à ces polluants, il est recommandé de combiner leur réparation avec l'application d'une protection cathodique par courant imposé, qui est donc un traitement non plus temporaire mais permanent, et seul procédé capable de fournir aux structures les courants de protection nécessaires de façon durable.

L'intérêt de ces techniques tient dans le fait qu'elles opèrent un traitement complet des aciers de la structure, contrairement à une réparation localisée (purge et ré-enrobage) dans un béton qui reste largement pollué et dont la dégradation va se poursuivre sur le pourtour de la zone réparée par effet d'anode induite.



Pouvez-vous nous décrire le dispositif technique des traitements ?

Pour ces deux traitements le principe est le même : il faut protéger le réseau d'armatures qui constituera donc la cathode. L'anode sera composée d'un treillis métallique encapsulé dans une couche de pâte de cellulose appliquée à la surface du béton. La pâte de cellulose sert de réservoir à une solution alcaline renouvelée durant toute la durée du traitement afin d'assurer la circulation du courant. Le réseau d'armatures continu du béton et le treillis sont reliés à une source de courant continu qui, sous une tension maxi d'environ 40 V pour éviter tout risque humain, va délivrer des densités de courant de l'ordre de l'ampère par m² d'acier.



Quelle est la durée moyenne de ces traitements ?

Il faut compter 2 à 3 semaines pour la réalkalination et 4 à 8 semaines pour l'extraction des ions chlorures.

Pendant les travaux, les tensions sont contrôlées et des échantillons de béton sont prélevés au droit des aciers pour analyser l'alcalinité et la teneur en ions chlorures.

Des mesures électriques indirectes, cartographie de potentiel ou de résistance de polarisation, peuvent également démontrer une application correcte du traitement puis une diminution (plutôt qu'arrêt) de l'activité de corrosion. La complémentarité de ces résultats de mesures déterminent la poursuite ou non du traitement.



Quel est le niveau d'efficacité de ce type de traitement ?

Le niveau d'efficacité nous est donné par les mesures que je viens d'évoquer.

Pour ce qui concerne la réalkalination, la polarisation induite sur les armatures va générer des ions hydroxydes qui vont faire remonter l'alcalinité du béton et donc le pH, ce que révélera le test à la phénophtaléine.

Pour ce qui concerne les chlorures, les carottes de béton prélevées doivent présenter une teneur en ions chlorures inférieure à 0,4 % de la masse du ciment à la profondeur des armatures selon la norme EN 206. Même si aujourd'hui ce seuil et sa valeur sont encore fortement discutés il est admis que c'est une concentration critique à partir de laquelle la probabilité d'amorçage de la corrosion des aciers est réglementairement élevée.

Dans un environnement où le béton restera exposé au CO₂ et/ou aux ions chlorures, il sera parfois pertinent de prévoir, en complément du traitement, l'application d'une protection en surface du parement (imprégnation hydrophobe, liant hydraulique modifié LHM, ...).

Ces traitements électrochimiques connaissent-ils des limites ?

Les méthodes électrochimiques pour des densités de courant de l'ordre de l'ampère par m² d'acier sont contre-indiquées pour les ouvrages précontraints dont les armatures peuvent être fragilisées par l'hydrogène dégagé par la réaction de réduction de l'eau.

Par ailleurs, l'ajout d'alcalins lors du traitement impose une étude préalable sur la nature des granulats au regard d'éventuels risques d'alcali-réaction. Enfin, la réalcalinisation, en présence de sulfates pourrait générer des composés expansifs.

Lorsque le béton est contaminé au-delà du premier lit d'armature, il convient alors d'appliquer une protection cathodique par courant imposé dont la conception et la mise en œuvre doivent être réalisées par du personnel certifié (on en reparlera un peu après).

Avez-vous en mémoire quelques chantiers marquants ?

Oui, remontons à 2003, si vous le voulez bien... Il s'agit d'extraire les chlorures des balcons d'un bâtiment résidentiel de Marseille, *La Grande Corniche*, exposé aux chlorures marins. Le chantier est donc un chantier de déchloruration électrochimique. Nous faisons alors le choix d'un système galvanique, sans générateur développé par Freyssinet et appelé procédé Regebeton : le courant est débité par couplage galvanique entre un treillis aluminium, qui sert d'anode sacrificielle, et l'acier des armatures qui joue le rôle de cathode.

En 2010, nous traitons la Piscine *Helios* à Charleroi en Belgique : le chantier dure 7 mois. Il s'agit de traiter intérieurement 400 m² de poteaux et poutres en 2 phases : extraction des chlorures suivie d'une réalcalinisation. A l'extérieur 2 100 m² de murs sont également traités en réalcalinisation.

En 2011, un chantier original nous est proposé : les 17 piles de fondation de la résidence *Monte-Carlo Star* à Monaco, soumises aux embruns marins, doivent changer de destination par création d'un lieu clos sur cet espace. Les piles, d'un diamètre de 1,8 m, sont donc traitées par application du procédé Freyssinet Regebeton d'extraction des chlorures sur une surface de 400 m².

Depuis 7 ou 8 ans la demande en extraction des chlorures est faible, alors qu'il s'agit d'une technique fiable et dont l'efficacité peut être démontrée de manière quantitative. De plus elle offre l'avantage par rapport à un simple *patch repair* de ne pas induire d'effet d'anode induite. La réparation serait alors plus durable.

Comment expliqueriez-vous ce phénomène ?

Les réparations à base d'électricité ne sont peut-être pas intégrées (encore) à la culture du génie civil et sans doute manquons-nous d'états de l'art convainquant comme ont su en rédiger les experts américains de la National Association of Corrosion Engineer (NACE).

Vos pratiques sont pourtant encadrées par des normes...

C'est exact et ceci de façon récente : la spécification technique sur FD/CEN/TS 14038-1, qui traite de réalcalinisation, date de 2004 et est devenu une norme européenne (EN 14038-1) en 2016 et la spécification technique FD/CEN/TS 14038-2, qui date de 2011, deviendra aussi une norme européenne en 2018.

Ces normes, de mon point de vue, sont sujettes à discussions car elles ne définissent pas réellement de critères à respecter : pour la quantité de charge, la durée de traitement, la densité de courant applicable, la taille des zones, seuls des seuils maxima sont définis. Ce flou n'aide pas le maître d'œuvre dans la rédaction d'un cahier des charges aux attendus clairs et intelligibles : donner l'assurance, par exemple, que le traitement respecte une mise en œuvre sécurisée d'un point de vue électrique, que les opérations de contrôle de l'efficacité du traitement sont bien spécifiées, etc.

Comment voyez-vous l'avenir des solutions électrochimiques ?

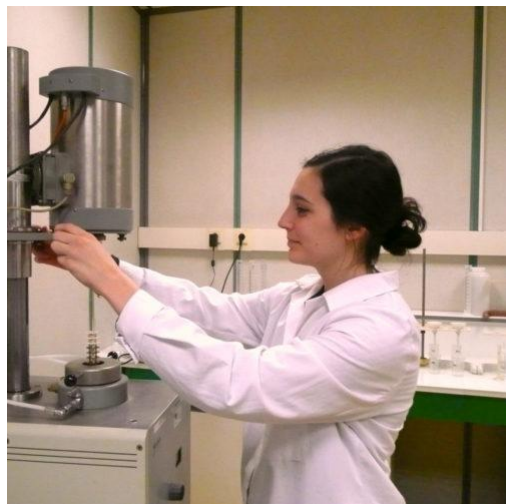
Cet avenir passe par la poursuite de la recherche, car les limites que nous pouvons rencontrer ne sont pas seulement économiques, elles sont également technologiques. Depuis les années 2000, des recherches au laboratoire et sur le terrain ont été menées par l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et des Technologies du Transport, de l'Aménagement et des Réseaux) anciennement le LCPC sur la protection cathodique, galvanique ou par courant imposé, et sur les traitements électrochimiques dont nous venons de parler. Malgré leur efficacité, ces techniques sont restées assez peu utilisées.

La recherche néanmoins se poursuit : ainsi une thèse a été soutenue à l'IFSTTAR le 3 octobre dernier sur ce beau sujet : « *Processus de corrosion et de réparation par traitement électrochimique d'extraction des ions chlorure dans les bétons armés doublement contaminés : carbonatation et chlorures* »...

D'un autre côté, le CEFACOR (Centre Français de l'Anticorrosion) poursuit depuis 2014 ses travaux pour la certification des personnels en protection cathodique secteur acier dans le béton armé qui a vu sortir un peu moins de 60 candidats certifiés au niveau technicien et 3 candidats certifiés au niveau expert. Ces activités nécessitent en effet du personnel compétent selon la norme EN ISO 15257 qui est l'occasion, pour la profession, de se structurer, et surtout l'assurance pour les maîtres d'ouvrage d'avoir à tous les stades, de la conception à la réalisation, des intervenants dont les compétences ont été éprouvées.

Portrait de Manon Becchis, chimiste au lerm

Posted on [15 janvier 2018](#) Author [Philippe Souchu](#) [Edit](#)



Manon, tu es sans doute la benjamine du lerm, comment es-tu venue à la chimie ?

Je suis venue à la chimie en ne faisant pas de cuisine !...

Voilà qui met en appétit ! Tu peux assaisonner un peu cette réponse ?

Oui ! Je suis quelqu'un de plutôt pratique, qui aime les activités manuelles et les manipulations. J'avais un goût prononcé pour la cuisine et souhaitais donc faire des études en ce sens. Mais, comme j'étais bonne élève

au collège, on m'a fait comprendre qu'une filière longue était plutôt obligatoire pour moi. Alors adieu la cuisine... et je suis entrée au lycée.

Là, les choses n'ont pas d'abord été très faciles, car je ne voyais pas trop où menaient tous ces programmes. Mais, en première, dans l'option Sciences et Vie de la Terre, je découvre (enfin !) la chimie, surtout par les travaux pratiques. Cela me parle au point qu'en terminale je choisirai une option physique-chimie, qui, ensuite me conduira à un DUT de chimie que j'obtiendrai à Grenoble.

Et la cuisine ?

Cela reste un plaisir... d'autant plus qu'on mange tous les jours. Je ne vais pas tarder à déménager : cela signifie que je vais avoir un four et que les choses sérieuses vont pouvoir commencer !

D'où te vient ce goût pour cette activité ?

Du plaisir qu'on prend, comme en chimie, à manipuler la matière. Cela m'est venu en observant et en imitant mes parents : je viens d'une famille où l'on cuisine et loin d'être une corvée, c'est pour moi un plaisir de réunir les gens autour d'un repas préparé.

Comment découvres-tu le lerm ?

Découvrir est le bon terme, car habitant Arles, j'ignorais que se logeait en plein centre ville un laboratoire comme celui-ci. C'est un ami qui m'indique que je peux y faire mon stage de trois mois pour le DUT. J'envoie donc une demande... et ma candidature est retenue...

Du coup, tu plonges dans les liants hydrauliques...

Impossible de faire autrement au lerm ! A l'IUT, j'avais suivi une option matériau plutôt axée sur les alliages métalliques. Ce domaine était donc nouveau pour moi et j'ai pu bénéficier de la formation et des conseils de Claude N'Gwé Moweni [dont tu as déjà fait le portrait](#). Je découvre cet univers par la pratique, par la paillasse : c'est une démarche qui me convient mieux que la seule théorie.

C'est avec Claude également que j'ai appris à m'organiser dans le temps pour être plus productive.

As-tu la possibilité de suivre les résultats que tu fournis au sein de l'étude, pour en saisir tout l'enjeu ?

Oui, c'est une possibilité, surtout si le ou la chargé(e) d'étude nous explique son besoin et sa problématique particulière. Mais nous effectuons aussi souvent des opérations de routine qui ne nous laissent pas le temps d'explorer les études qui les commandent.

Après ce stage, tu entres donc au lerm...

Ah, non... pas tout de suite !... Tu sautes trop vite la case angoisse de la recherche de travail...

Cela a été si dur que cela ?

Pour moi, oui... Cela dure sept mois : tu n'as pas de moyens personnels ; tu dois habiter chez tes parents ; tu écris des centaines de lettres qui restent sans réponse ; tu finis par douter de tout et de toi-même... Et puis, le croiras-tu, je trouve deux boulots le même jour !

L'un dans un laboratoire à Aix-en-Provence et l'autre dans une mission d'interim de quelques mois pour laquelle je m'étais déjà engagée et que je prends donc. C'est à Lyondell Basell à Fos-sur-Mer, où nous travaillons surtout sur le contrôle des polymères.

A l'issue de cette mission, je propose mes services au lerm... qui, justement, a besoin d'une chimiste.

Si bien que tu travailles à Arles où tu habites...

Oui et où, même, je suis née. Je trouve qu'il s'agit d'une vraie chance car je suis très attachée à cette ville : à sa beauté, à son patrimoine, à sa situation géographique, aux amis que j'y ai.

Pas une envie d'ailleurs ?

Arles est ailleurs, puisque le lerm y est venu !... et pour l'autre ailleurs dont tu parles, il y a les voyages : voyages en Europe et bientôt plus loin. C'est en projet.

Comment vois-tu l'évolution de ton poste au lerm ?

Je suis encore toute jeune ici et la chimie de paillasse, je te l'ai dit, me convient bien. Mais je commence à m'intéresser à la métrologie et au contrôle des appareils et je suis preneuse de formation interne qui me permettrait d'appréhender d'autres aspects de la vie du laboratoire.