

# Lerm Infos n° 30 : L'altération du béton en zone de marnage

2 juillet 2015



Juillet 2015

La lecture de cette lettre est optimale avec Chrome ou Firefox.



Télécharger la Lettre d'information

## Editorial

Après notre dernière lettre d'information sur la précontrainte, la saison qui vient nous inviterait plutôt à la relaxation... nous vous invitons donc au bord de la mer. Et si nous nous intéressions à l'estran et à la zone de marnage ?

Nous n'avons pourtant dans nos bagages ni époussette, ni masques, ni palmes. C'est en effet l'altération du béton en zone de marnage qui occupera notre été.



Cette zone est particulièrement intéressante : elle est, pour ce matériau, la zone de tous les dangers car de nombreux mécanismes délétères y sont réunis et associés.

Cette question de la durabilité des bétons à la mer remonte à l'invention du béton lui-même ! En effet, c'est à l'occasion de la construction d'un phare que Smeaton entrepris, en 1756, ses **recherches sur les chaux hydrauliques** à l'époque où notre vieux continent s'ouvrant sur la mer, commencèrent de grands travaux maritimes... Vinrent ensuite Candlot et Le Chatelier, qui s'intéressèrent à « *La décomposition des mortiers à la mer* »<sup>1</sup>.

En vous souhaitant donc un bon été à tous, allons donc y voir de plus près !



Bonne lecture !

Bernard Quénée, directeur général délégué

Philippe Souchu, rédacteur en chef

<sup>1</sup> Titre d'une série d'articles de H. Le Chatelier dans « Le Ciment » en 1900 et 1901.

## Dossiers techniques



### Les bétons à la mer

En France, avec un peu plus de 19000 kilomètres d'un littoral construit d'installations portuaires, de digues et de bâtiments, la question de la durabilité du béton dans cet environnement maritime est un enjeu important...



### Altération d'un béton à la mer en zone de marnage

La zone de marnage est celle où le béton est le plus vulnérable, car c'est là que s'associent l'ensemble des phénomènes agressifs : physiques, chimiques, climatiques...



### Les réponses à l'agression maritime : un béton compact au ciment adapté

Dans ce contexte d'agressions couplées, la compacité du béton est un élément clé de sa durabilité dans la mesure où elle conditionne une faible perméabilité et une faible diffusivité, paramètres de résistance à la diffusion des ions agressifs.

Cette compacité du béton doit être doublée par une résistance du liant hydraulique à l'agression chimique...

# Les bétons à la mer

2 juillet 2015

En France, avec un peu plus de 19000 kilomètres d'un littoral construit d'installations portuaires, de digues et de bâtiments, la question de la durabilité du béton dans cet environnement maritime est un enjeu important.

Le béton étant un système chimique sensible (porosité et phénomènes de transport) au milieu dans lequel il s'insère, ce système est instable : cela revient à dire que l'environnement d'un béton influe directement sur sa durabilité.

Le milieu maritime, du fait de la **composition chimique de l'eau de mer**, est généralement considéré comme agressif pour le béton. L'intensité de cette agressivité dépend elle-même de la situation de l'ouvrage ou d'une partie de l'ouvrage par rapport à la mer.

Les mers et les océans étant généralement sujets à marée, on appelle marnage la différence de hauteur d'eau mesurée entre les niveaux d'une pleine mer et d'une basse mer consécutives. La zone comprise entre ces niveaux est donc appelée zone de marnage ou zone intertidale.

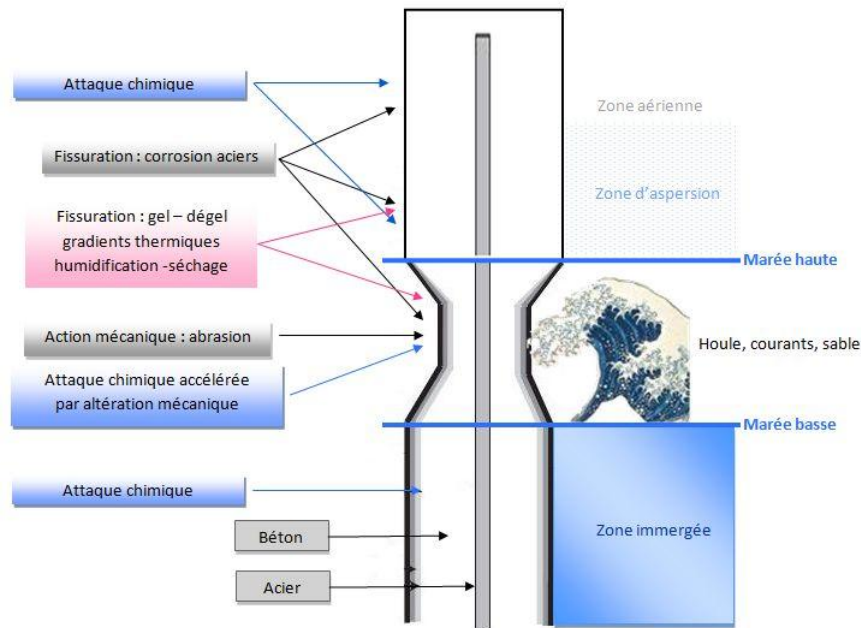


Marnage dans un port Normand

L'observation du béton à la mer a permis d'identifier cinq zones dans lesquelles le béton est exposé à des niveaux et à des mécanismes d'agression différents, mais souvent conjugués :

- la zone d'immersion,
- la zone de marnage,
- la zone d'aspersion
- la zone aérienne.

La figure suivante synthétise les agressions auxquelles est soumis le béton en fonction de son environnement marin :



Zone d'agression d'un béton à la mer

d'après Metha et Hokusai

### Les agressions chimiques

De manière générale, l'agression marine sur le béton, parce qu'elle est le fait de multiples facteurs, est complexe à décrire : les réactions chimiques au sein de la matrice cimentaire y sont diverses, parfois contraires, initiées par les nombreux ions dissous dans l'eau de mer (chlorures, sulfates et carbonates pour les principaux).

Les principaux mécanismes sont les suivants :

- dissolution et lixiviation du calcium des composés calciques du béton  $\text{Ca(OH)}_2$  et C-S-H. Ces réactions provoquent un accroissement de la porosité du béton ;
- précipitation de produits pouvant être expansifs (ettringite), de composés insolubles plus ou moins protecteurs ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$ ) ;
- échange de bases  $\text{Ca}^{++} \leftrightarrow \text{Mg}^{++}$  avec formation de brucite  $\text{Mg(OH)}_2$  insoluble, et transformation des C-S-H initiaux en C-M-S-H plus ou moins riches en magnésium

## Les agressions physiques

Les agressions physiques et mécaniques sur le béton se conjuguent :

l'action mécanique de la houle et des courants s'associe à l'érosion provoquée par les sables en suspension,

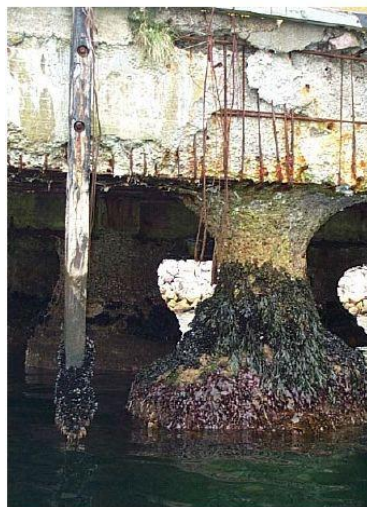
les cycles d'humidification-séchage, favorisés par le vent, accélèrent le processus de transfert des chlorures

enfin, pour certaines zones géographiques, le béton est soumis à des cycles de gel-dégel

L'altération mécanique de la matrice cimentaire (porosité et fissuration) permet une accélération des transports d'ions et aggrave les processus chimiques d'altération.

Enfin, la corrosion des armatures en acier est favorisée par la teneur en chlorures de l'eau de mer et sa richesse en oxygène dissous, due au brassage de surface. Le résultat de cette corrosion est, outre la dissolution du fer, la formation de produits expansifs (oxydes de fer et hydroxydes), dont les effets viendront accentuer la dégradation du béton.

En somme, la zone de marnage est l'horizon dans lequel le béton sera le plus vulnérable, en raison de la superposition de l'ensemble des phénomènes énumérés ci-dessus.



Béton dégradé en zone de marnage (© CETMEF)

C'est à la dégradation des bétons dans cette zone particulièrement délétère que nous allons maintenant nous intéresser.

# Altération d'un béton à la mer en zone de marnage

19 juin 2015

La zone de marnage est le lieu de toutes les agressions du béton qui est exposé là où s'exercent ensemble les phénomènes énumérés précédemment...

En nous intéressant maintenant à la dégradation des bétons dans cette zone particulièrement exposée, gardons présent à l'esprit que l'altération mécanique du béton par le houle et le courant (chocs, abrasion) favorise puis accélère les processus d'altération chimique.



## L'attaque chimique par l'eau de mer

L'eau de mer contient plusieurs espèces dissoutes dont la concentration est élevée. Ces espèces sont plus ou moins agressives vis-à-vis de la matrice cimentaire. L'attaque de cette dernière par l'eau de mer résulte de plusieurs mécanismes physico-chimiques plus ou moins concomitants et interdépendants.

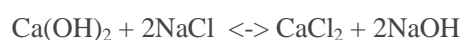
## L'attaque de la matrice cimentaire par les chlorures

La pénétration des chlorures dans le béton qui est un milieu poreux se fait en présence d'eau. [Voir notre article](#) sur les chlorures dans le béton.

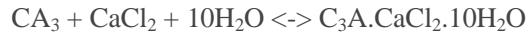
### Chlorure de sodium

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 :



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 de calcium avec l'aluminate tricalcique  $\text{C}_3\text{A}$  et les aluminates hydratés :



Ces monochloroaluminates de calcium, communément appelés **chlorures liés**, consomment des chlorures et par conséquent en réduisent le taux d'ions libres en solution (**ou chlorures libres**), ce qui retarde finalement 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 secondairement 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, accentués par les effets cycliques d'hydratation puis de séchage, peuvent à leur tour engendrer des pressions de cristallisation – retrait, qui provoquent un écaillage de surface. Sans compter un phénomène de lixiviation de la chaux, qui accroît encore la porosité du béton...

#### Chlorure de magnésium

Ce sel exerce également une action dissolvante sur la chaux. Mais le gel alors en solution conduit à la formation de brucite (Mg(OH)<sub>2</sub>) :



... brucite, qui, une fois précipitée en surface du béton, peut ralentir la pénétration des ions agressifs à l'intérieur. A l'image du 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...

#### **L'attaque de la matrice cimentaire par les sulfates**

##### Sulfate de magnésium

Ce sel, très agressif, associe différentes réactions : Réactions de dissolution Ca<sup>++</sup> de l'hydroxyde de calcium et des C-S-H et d'échange avec les ions Mg<sup>++</sup> de l'eau de mer. Ces réactions conduisent à la précipitation de brucite Mg(OH)<sub>2</sub>, à la transformation progressive des C-S-H en composés C-M-S-H et M-S-H sans propriétés liantes, ainsi qu'à la formation de gypse :



La réaction du sulfate avec les aluminates du liant conduit à la précipitation d'ettringite pouvant être expansive :

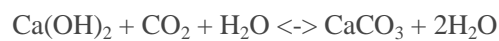




La lixiviation des C-S-H et l'expansion de l'ettringite provoquent, l'une un accroissement de la porosité, l'autre une fissuration qui majorent les processus d'altération par l'accélération des transferts d'ions au sein de la matrice.

### **Action du dioxyde de carbone**

Présent dans l'eau de mer sous forme de bicarbonate de potassium, il dissout l'hydroxyde de calcium et les C-S-H et produit ainsi des carbonates de calcium (CaCO<sub>3</sub>) qui précipitent sous la forme de calcite, minéral beaucoup moins soluble qui peut ainsi atténuer les processus d'altération chimique :



La thaumasite (CaSO<sub>4</sub>.CaSiO<sub>3</sub>.CaCO<sub>3</sub>.15H<sub>2</sub>O), potentiellement expansive, peut également se former dans les bétons en cours de dégradation par l'eau de mer, à partir des sulfates de l'eau de mer, de la silice libérée suite à la dégradation des C-S-H et du CO<sub>2</sub> ou à partir de l'ettringite à laquelle elle peut se substituer...

### **Corrosion des armatures**

Ces attaques chimiques se conjuguent avec la **corrosion des armatures** favorisée par la migration des ions chlorures et le dépassement d'une teneur critique au niveau de l'acier, l'eau évidemment et la teneur en oxygène de l'eau de surface. Cette corrosion, outre la dégradation des aciers, génère des produits expansifs qui font fissurer le béton d'enrobage et accélèrent encore le processus général d'altération.

... qui a dit que la mer était un endroit paisible ?

# Les réponses à l'agression maritime : un béton compact au ciment adapté

2 juillet 2015

Dans ce contexte d'agressions couplées, la compacité du béton est un élément clé de sa durabilité dans la mesure où elle conditionne une faible perméabilité et une faible diffusivité, paramètres de résistance à la diffusion des ions agressifs.

Cette compacité du béton doit être doublée par une résistance du liant hydraulique à l'agression chimique.



## Le béton : compacité

La norme NF EN 206-1/CN impose le respect d'exigences précises pour la résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée d'utilisation de la structure. Ces conditions environnementales sont résumées par des classes d'exposition :

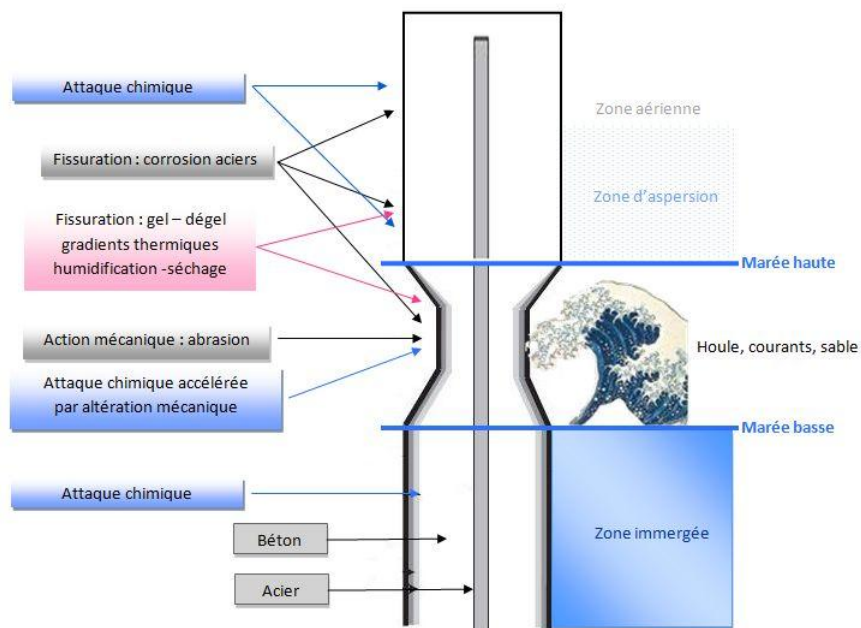
<b>Classes d'exposition de la norme NF EN 206-1/CN</b>
Attaques gel/dégel avec ou sans agents de déverglaçage XF1, XF2, XF3, XF4
Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer XS1, XS2, XS3
Corrosion induite par carbonatation XC1, XC2, XC3, XC4
Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine

XD1, XD2, XD3
Attaques chimiques XA1, XA2, XA3

Pour chacun des ces classes, la norme, dans son tableau NA. F.1, précise les valeurs limites pour la composition et les propriétés du béton :

- teneur minimale en liant équivalent,
- rapport  $\text{Eau}_{\text{efficace}}/\text{liant}_{\text{équivalent}}$  maximal,
- classe de résistance minimale du béton,
- teneur minimale en air (le cas échéant).

Pour les parties d'un ouvrage en béton armé tel que ci-dessous,



voici les classes d'exposition qui leur correspondent :

Localisation de la partie de l'ouvrage	Classes d'exposition
Béton en zone d'aspersion	XS3
	XC2
Béton en zone de marnage	XS3
	XC4

Béton immergé	XS2 XC1
---------------	------------

Ce tableau suppose que les ouvrages ne sont exposés ni à des attaques chimiques (classes XA), ce qui peut être le cas dans les ports de commerce, ni à des cycles de gel/dégel (classes XF)

## Approche performantielle

A côté de la prescription normative que nous venons d'envisager, se sont développées, principalement pour des ouvrages à la durée de vie exceptionnelle ou soumis à des contraintes environnementales particulières, des approches dites performantielles. Plutôt que l'obligation de moyens en termes de formulation, ces approches visent directement les résultats en termes de performance de durabilité : [lire notre article sur ce sujet](#).

Par ailleurs, nous pouvons noter que dans le cas d'une problématique de barrage, La Compagnie Nationale du Rhône a développé deux essais de qualification du béton pour sa résistance à l'abrasion et aux chocs. Ces essais, qui peuvent être importés dans la problématique maritime, permettent de déterminer un « indice CNR » de résistance.

## Le ciment : résistance aux attaques chimiques

La norme NF P15-317 définit les ciments pour travaux à la mer qui sont également destinés à être utilisés en environnement moyennement agressifs vis-à-vis des sulfates.

Globalement, pour les travaux à la mer, la teneur de ces ciments en  $C_3A$  et en  $SO_3$  est limitée, ainsi que la teneur en  $C_3S$ , principale source de portlandite, vulnérable, comme nous l'avons vu à l'eau de mer.

Pour la même raison de limitation de la portlandite, les ciments composés à base de cendres volantes, de pouzzolanes, de fumées de silice et de laitier granulé de haut fourneau sont recommandés pour le béton en environnement maritime.

## Une mise en œuvre du béton au service de la compacité

Qualité de la vibration : une vibration insuffisante permet l'emprisonnement de nombreuses vacuoles d'air qui accroissent la porosité du béton et impactent leur compacité.

Cure : dès le décoffrage, en l'absence de cure efficace, la réaction d'hydratation du béton de peau est ralentie, ce qui génère une porosité capillaire particulièrement pénalisante pour cette zone du béton qui protège les armatures.

Fissurations au jeune âge : liées au tassement, au retrait plastique, thermique ou endogène, elles deviennent un facteur de pénétration des ions agressifs et doivent donc, autant que possible, être évitées ou limitées



## **Enrobage des armatures**

Compacité du béton et résistance et ciment adapté doivent se doubler dans cet environnement particulièrement agressif d'un enrobage optimisé des armatures.

## **Armatures inox**

Enfin, toujours dans la perspective de la lutte contre la corrosion des armatures, l'utilisation d'acier inoxydable devient une alternative très sérieuse pour la zone de marnage, dès lors qu'une exigence particulièrement élevée de durée de vie est requise. Cette utilisation doit faire l'objet d'un bilan global, qui prend en compte les contraintes techniques mais aussi l'environnement économique du projet.