

2.4 ACTION DES SULFATES, DE L'EAU DE MER ET ATTAQUE PAR LES ACIDES

- L'attaque par les sulfates peut **détériorer très significativement le béton** dans un laps de **temps relativement court** (10 à 15 ans).
- L'eau **de mer** contient des sulfates en solution. On peut aussi les retrouver en solution dans les **eaux souterraines**, dans les eaux **usées industrielles** et dans certains **sous-produits industriels**.
- La plupart des **sols** contiennent des sulfates sous la forme de **gypse** (généralement entre 0,01% et 0,05 % (sol sec) exprimés en SO_4). Ces **concentrations relativement faibles** ne sont généralement **pas agressives** pour le béton.
 - La solubilité du gypse dans l'eau à température normale est relativement faible (approx 1400 mg/litre).
- Dans les eaux souterraines, les **concentrations plus élevées** en sulfates sont généralement dues à la présence de **sulfates de magnésium** (MgSO_4) ou de **sulfates alcalins** (K_2SO_4 - Na_2SO_4).
- Les **sulfates d'ammonium** $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ se retrouvent fréquemment dans les sols et les eaux en **milieux agraires**.
 - L'activité agricole peut aussi générer différents types **d'acides organiques** (lactique, acétique, etc)
- Les **effluents des fours** utilisant des combustibles riches en soufre et les effluents des industries chimiques peuvent contenir de **l'acide sulfurique**.
- La décomposition des matières organiques dans les égouts, les silos ou dans les réservoirs d'entreposage peut conduire à la formation de **H_2S** (gaz) qui peut être transformé en **acide sulfurique** par **l'activité bactérienne**.

2.4.1 Attaque par les sulfates

- Les sulfates peuvent être d'origine **naturelle**, **biologique** ou provenir de **pollution domestique et industrielle**.
- Dans certaines régions où les sols contiennent du **gypse** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de **l'anhydrite** (CaSO_4), on peut rencontrer des concentrations élevées (> 5%).
 - Afrique du Nord
 - **Prairies canadiennes**
 - Région parisienne

Na_2SO_4	(58 g/L)
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	(194 g/L)
K_2SO_4	(111 g/L)
$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	(440 g/L)
CaSO_4	(2,1 g/L)

- Les **eaux souterraines** en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions SO_4^{2-} .
- Les sols **alluviaux ou argileux** peuvent aussi contenir des **pyrites** qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et d'humidité avec formation d'acide sulfurique (voir section).
- Les sulfates peuvent aussi provenir de la **décomposition biologique aérobie** de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).
- Les sources de sulfates peuvent aussi être internes
 - Contamination des granulats par du plâtre
 - Granulats gypseux
 - Sulfures dans certains granulats

2.4.1.1 Mécanismes de base

- Les sulfates peuvent détériorer le béton selon **deux mécanismes physico-chimiques**:
 - Expansion

- Perte des propriétés liantes des C-S-H

- Les mécanismes de destruction sont **fonction de la concentration** et de la **source des ions sulfates** (le cation qui leur est associé) dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment.
 - L'action des sulfates peut prendre la forme d'une **expansion** du béton suite à la formation de produits expansifs (Fig 2.86)
 - Lorsque le béton se fissure, la perméabilité augmente et l'eau agressive peut pénétrer plus facilement, ce qui accélère de rythme de destruction.
 - Ces expansions peuvent causer des **dommages structuraux** considérables
 - L'action des sulfates peut aussi engendrer une **perte de résistance et une perte de masse** du béton en surface (Fig 2.87).
 - Ces effets sont alors dus à l'altération des propriétés liantes de certains hydrates.

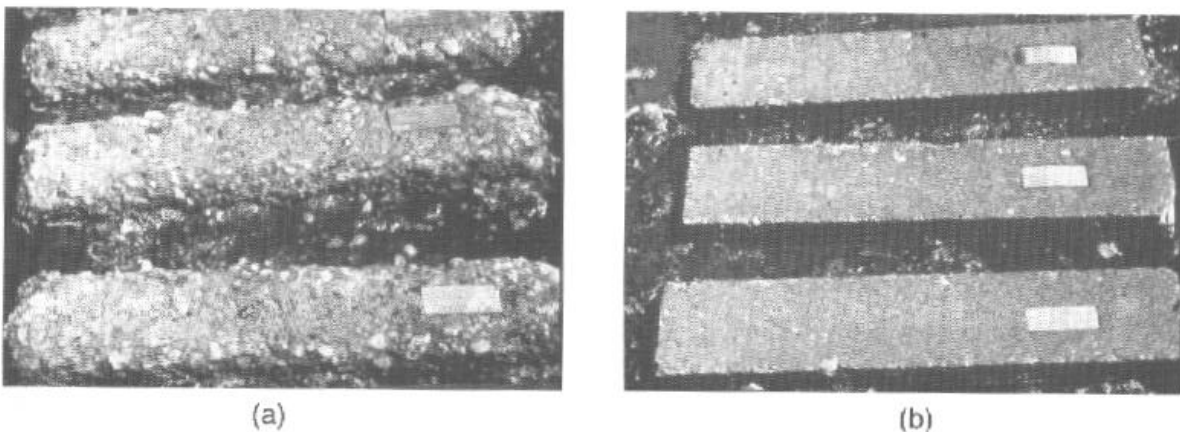


Fig 2.86 - Éprouvettes de béton dégradées après 5 ans de contact avec des sols riches en sulfates.

a: E/C = 0,50

b: E/C = 0,39

[Tiré de CONCRETE CONSTRUCTION ENGINEERING HANDBOOK 1997, Edward G. Nawy Editor, CRC Boca-Raton, Florida].



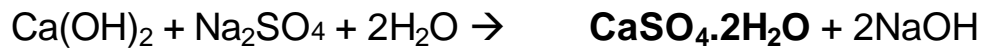
Fig 2.87 - Béton détérioré par une attaque par les sulfates - Barrage Fort Peck sur la rivière Missouri au Montana.
[Tiré de MEHTA, P. K. Concrete Structures, Properties and Materials 1986, Prentice Hall, USA, 450 p.]

2.4.1.2 Les deux types d'interactions chimiques.

- Les **aluminates** et la **portlandite** sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates.
- Les dégradations peuvent survenir suite à la formation de **produits expansifs**

- Les expansions peuvent résulter de la formation **d'ettringite secondaire** (l'ettringite primaire n'est pas expansive).

- 1) Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates). Dans le cas du sulfate de sodium:

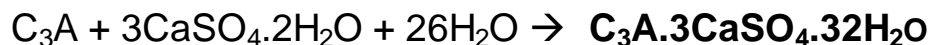


NaOH : Alcalinité élevée -> stabilisation des C-S-H.

CaSO₄·2H₂O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, Dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

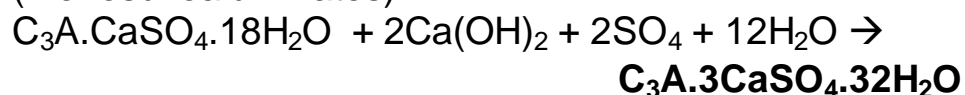
- 2) Formation **d'ettringite secondaire**,

- à partir du **C₃A anhydre** résiduel:

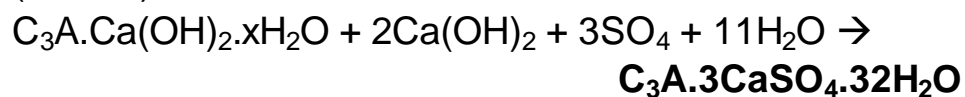


- à partir des **aluminates hydratés**:

(monosulfoaluminates)



(C₄AH_x)



- ° Dépendant de la **composition de la solution interstitielle**, (particulièrement de la concentration en portlandite), la cristallisation de **l'ettringite secondaire peut être expansive**.
- ° La **précipitation rapide de l'ettringite** conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le **volume molaire est de 3 à 8 fois supérieur** (suivant qu'il s'agit du C₃A ou du C₄AH₁₃) au volume du solide initial (Fig. 2.88).

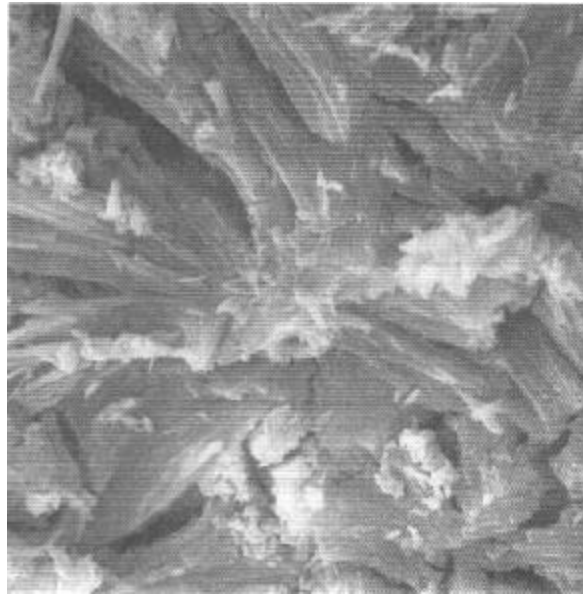


Fig 2.88 - Ettringite massive mal cristallisée expansive formée topochemiquement
[Tiré de BARON, J. ET OLLIVIER J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École nationale des Ponts et chaussées, 453 p.].

- ° Dans les **ciments qui libèrent moins de portlandite** (CHF, CLK - ciment avec laitier), l'ettringite précipite à partir de la solution dans les vides interstitiels du béton et la **cristallisation en aiguilles n'est pas expansive** (Fig 2.89).

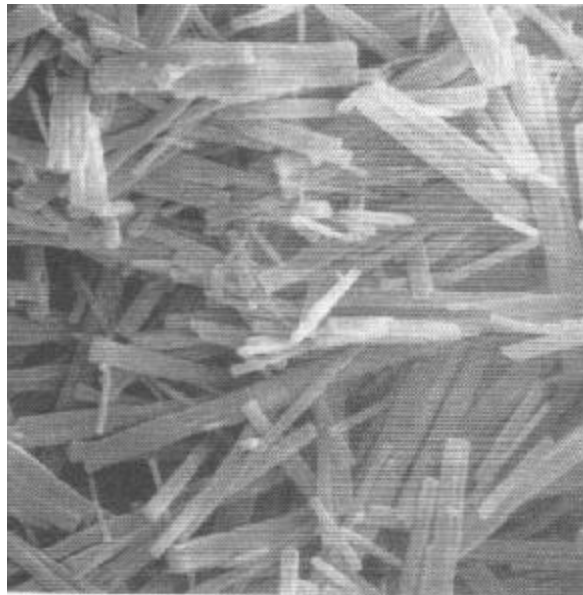
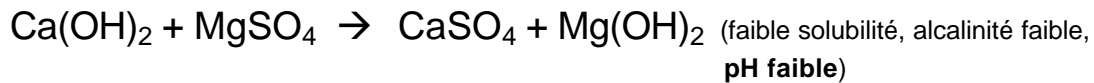
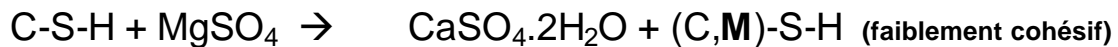


Fig 2.89 - Ettringite bien formée non expansive précipités à partir de la solution
[Tiré de BARON, J. ET OLLIVIER J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École nationale des Ponts et chaussées, 453 p.].

- Le **sulfate de magnésium** est **très agressif** (double action)



Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les C-S-H :



- L'attaque par le **sulfate de calcium** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou CaSO_4 dans les sols) est plus lente en raison de sa faible solubilité. Elle conduit à la formation d'ettringite expansive.
- L'attaque par le **sulfate de sodium** (très soluble) (Na_2SO_4) entraîne la formation d'ettringite secondaire expansive.
- Le **sulfate de potassium** (K_2SO_4) peut aussi être agressif. Le rythme d'attaque est similaire à celui du sulfate de sodium.
- La plupart des **sulfates métalliques solubles** (FeSO_4, \dots) peuvent être **agressifs (notamment en présence de certaines bactéries)**.
 - Problèmes de soulèvement des dalles sur des fondations contenant des shales pyritiques

2.4.1.3 Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates du béton

- La résistance aux sulfates augmente avec la teneur en ciment.
 - Les bétons avec un **dosage en ciment plus élevé** sont généralement plus compacts et ont une **perméabilité plus faible** qui **ralentit la pénétration des sulfates** et de l'ion qui leur est associé.
- Le **taux de dégradation** est proportionnel à la quantité de **C_3A** du ciment (Fig 2.90)

Un béton poreux (faible dosage en ciment) peut être vulnérable mais si la teneur en C₃A du ciment est faible.

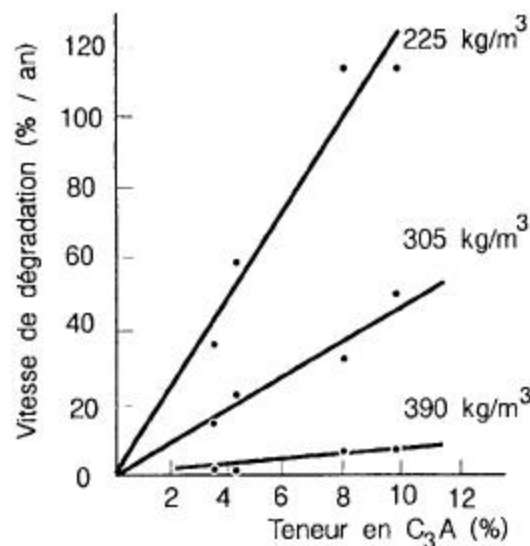


Fig 2.90 - Influence du dosage en ciment et de la teneur en C₃A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na₂SO₄ à 10%).

[Tiré de VERBECK, G.J. 1968 *Field and laboratory studies of the sulphate resistance of concrete*, PCA Research Department Bulletin 227, 113-124].

- **Les ajouts minéraux** (particulièrement les laitiers) permettent généralement **d'augmenter la résistance aux sulfates**.
 - Moins de ciment => teneur en C₃A plus faible dans le béton.
 - **Perméabilité plus faible**
 - Fumée de silice et cendres volantes: Moins de Ca(OH)₂ dans la pâte de ciment hydraté (réaction pouzzolanique)
 - **Les ciments contenant 40% ou plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates (Fig 2.91).**

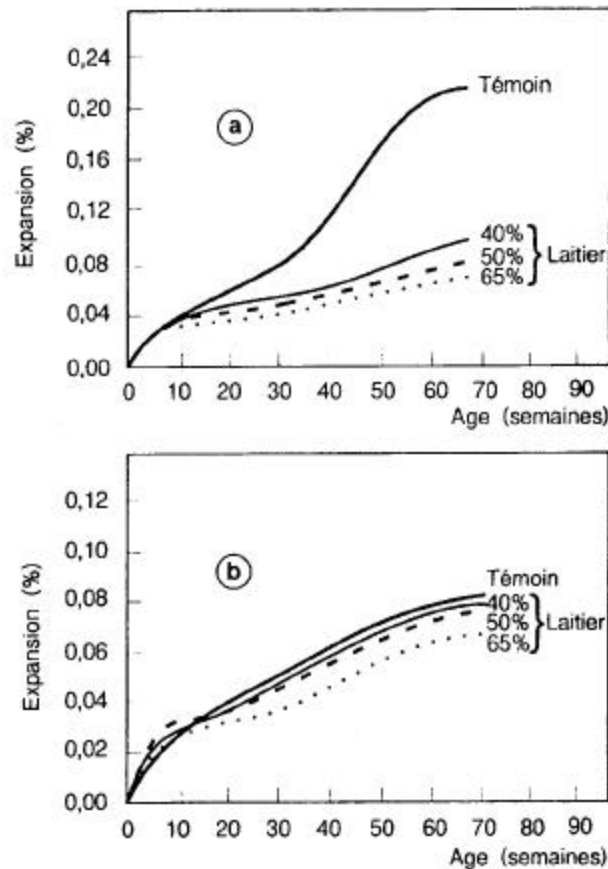


Fig 2.91 - Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier.

a: Ciment type II 6,4% de C₃A

b: Ciment type V 3,7% de C₃A

[Tiré de DOUGLAS, E. 1989 *Mortier de ciments au laitier et béton de laitier: caractéristiques de durabilité* dans: *Matériaux complémentaires en cimentation* CANMET V.M. Malhotra éditeur, p. 373-411].

- ° Les ciments avec **plus de 20% à 30% de cendres volantes** ont une **meilleure résistance aux sulfates** (Fig2.92). L'effet des cendres est variable en fonction de leur composition chimique. Les cendres ayant un contenu en chaux > 20% ne devraient pas être utilisées.
- ° La **fumée de silice** (7%-10%) **améliore** très significativement la résistance aux sulfates.

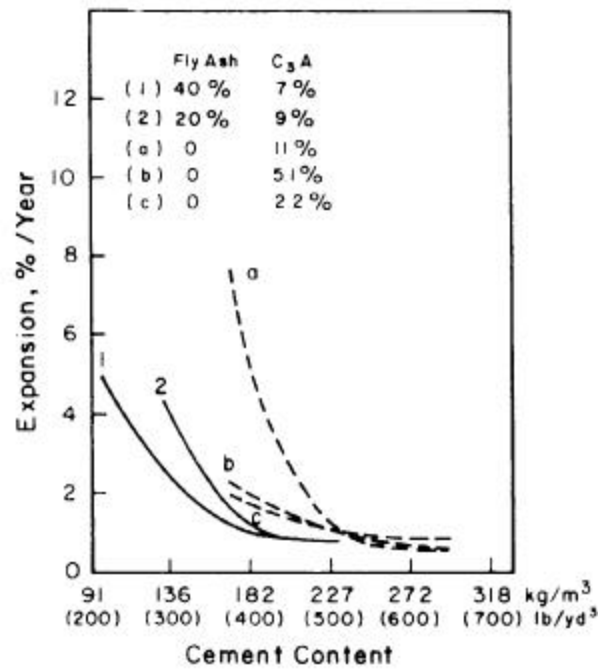


Fig 2.92 - Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier.
 [Tiré de BROWN G .E. AND OATES, D. B. 1983 Concrete International, Vol. 5 pp. 36-39].

- **La sévérité de l'attaque** est fonction de la **concentration** en sulfates
- La norme **CSA A23.1 section 15 Tableau 10** présente quelques exigences de formulation en fonction du degré d'exposition aux sulfates.

Tableau 10
Exigences relatives au béton exposé aux attaques des sulfates*

Classe d'exposition	Degré d'exposition	Sulfates hydrosolubles (SO ₄) dans l'échantillon de sol, %	Sulfates (SO ₄) dans les échantillons d'eau de la nappe phréatique, mg/L	Résistance minimale spécifiée à la compression à 28 jours, MPa†	Rapport maximal eau/liant‡	Type de ciment portland à utiliser‡
S-1	Très intense	Plus de 2,0	Plus de 10 000	35	0,40	50
S-2	Intense	0,20 à 2,0	1 500 à 10 000	32	0,45	50
S-3	Modérée	0,10 à 0,20	150 à 1 500	30	0,50	20§, 40 ou 50

* Pour l'exposition à l'eau de mer voir l'article 15.4.

† Voir l'article 15.1.4.

‡ Voir l'article 15.1.5.

§ Ciment de type 20 à résistance modérée aux sulfates (voir l'article 3.1.2).

2.4.2 Attaque l'eau de mer

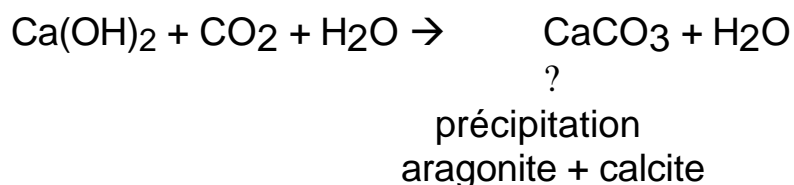
- La durabilité du béton en milieu marin est fonction d'un nombre relativement important de paramètres.
 - **Paramètres chimiques** (ions agressifs)
 - **Paramètres géométriques** (marées et fluctuation du niveau de la mer)
 - **Paramètres physiques** (cycles de gel-dégel, activation par les hautes températures)
 - **Paramètres mécaniques** (abrasion)

Une faible porosité et une faible perméabilité sont essentielles pour obtenir un bon comportement face à l'eau de mer.

- Un béton **bien formulé et bien mûris** possède généralement une très **bonne durabilité face à l'eau de mer**.
 - Des ouvrages maritimes en Belgique sont encore en très bonne condition après plus de 100 ans d'exposition à l'eau de mer.
- Des **dégradations peuvent apparaître très rapidement (5 à 10 ans)** dans le cas d'ouvrages mal conçus (**mauvais recouvrement des armatures**) ou fabriqués avec un béton de mauvaise qualité (**choix du type de ciment, dosage en ciment trop faible, E/C trop élevé, etc.**).

2.4.2.1 Les principaux mécanismes d'attaque par l'eau mer

- **Action du CO₂** (carbonatation)

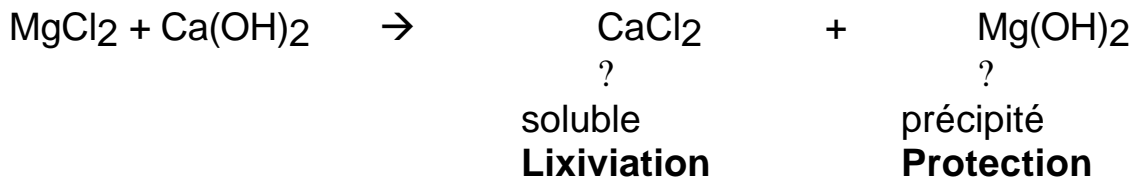


Protection

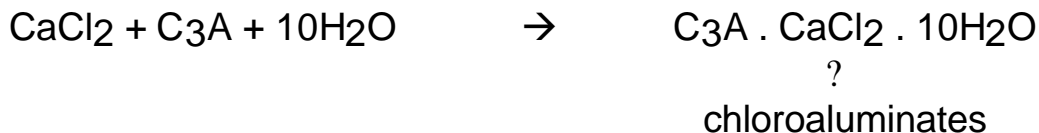
• Action des chlorures

A) **Corrosion** (sera vu en détail à la section 2.5)

B) **MgCl₂** : substitution Mg²⁺ → Ca²⁺ (peu dommageable)

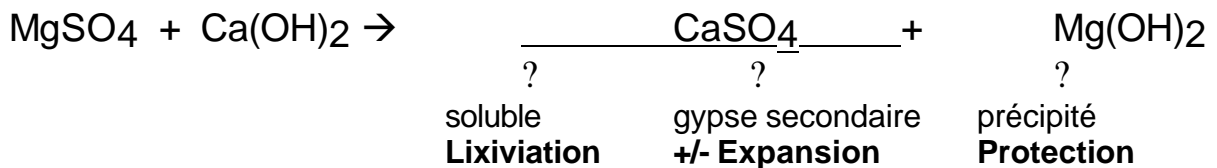


C) **CaCl₂** : (peu dommageable)

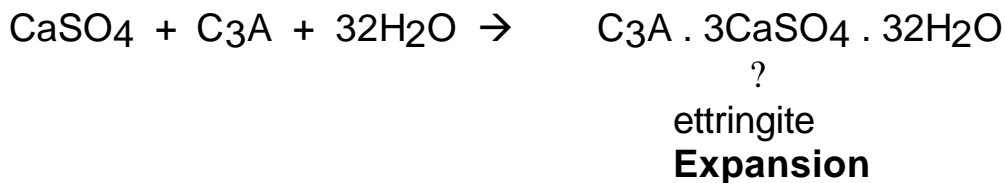


• Action des sulfates

A) **MgSO₄** : substitution Mg²⁺ → Ca²⁺



B) **Gypse secondaire**



C) **Substitution Mg²⁺ → Ca²⁺** (voir section 2.4.1.2)

- Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H
- Perte des propriétés liantes des C-S-H

L'interférence des ions explique que l'agressivité de l'eau de mer soit bien plus faible que celle des eaux sulfatées ¹

- Les différents types d'attaques ont des **localisations préférentielles** qui progressent vers l'intérieur du béton (Fig 2.93).

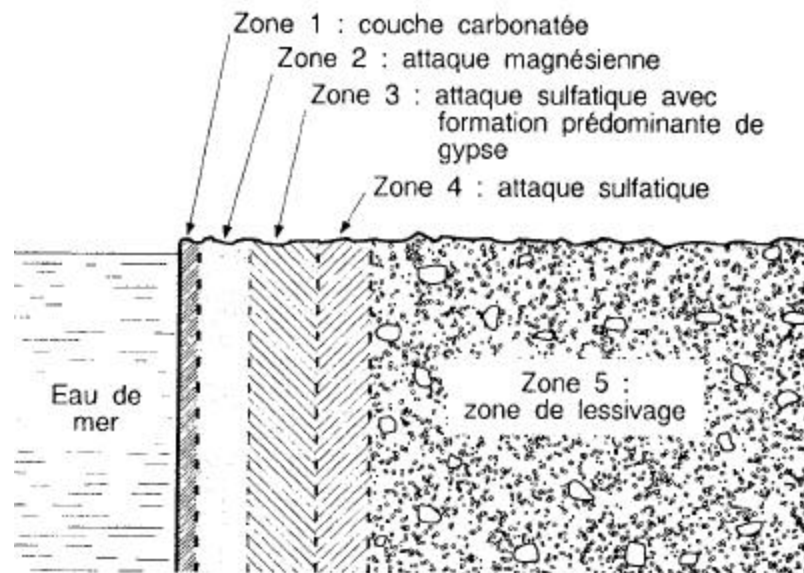


Fig 2.93 - Schématisation des zones d'attaque du béton par l'eau de mer (zone immergée).

[Tiré de BARON J. et OLLIVIER J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 453 p.].

- **L'attaque par l'eau de mer est fortement conditionnée par la température de l'eau.**
 - Activation des réactions chimiques - **accélère la cinétique des réactions** de dégradation.

- En mer du Nord (10°C) : agressivité beaucoup plus faible
- Dans les mer chaudes (> 25°C) : Dégradations rapides et très sévères.

¹ BARON J. et OLLIVIER J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 453 p.

2.4.2.2 Paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin

- **Perméabilité** - Une faible perméabilité retarde la pénétration des ions agressifs.
- **Rapport E/C** - Un rapport E/C faible diminue la porosité, la perméabilité et retarde la pénétration des ions agressifs.
- **Recouvrement** - Il faut prévoir un bon recouvrement (60 mm) des aciers d'armature pour éviter la corrosion métallique.
- **Type du liant**
 - Un ciment à faible teneur en C₃A (Type V) et en C₃S peut être nécessaire (Fig 2.94).
 - Utiliser un ciment ayant un rapport $\frac{C_3A}{SO_3}$ inférieur à 3 (Fig. 2.95).
 - Le choix du type de liant est un paramètre important de la durabilité des bétons en milieu marin
 - L'expérience européenne montre que les liants contenant une forte teneur en laitiers (>60%) ont un bon comportement en eau de mer.
- Attention à la **cure**.
- Mise en place soignée.

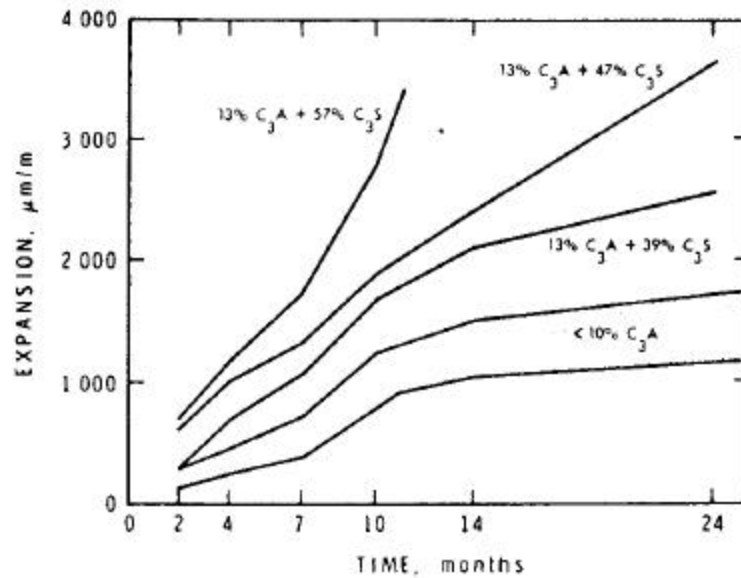


Fig 2.94 - Expansion d'échantillons de mortier conservés dans l'eau de mer.
 [Tiré de RAMACHANDRAN V.S.; FELDMAN, R.F. ET BEAUDOIN, J.J. 1981 *Concrete science - Treatise en current research*, Heyden, 427 p.]

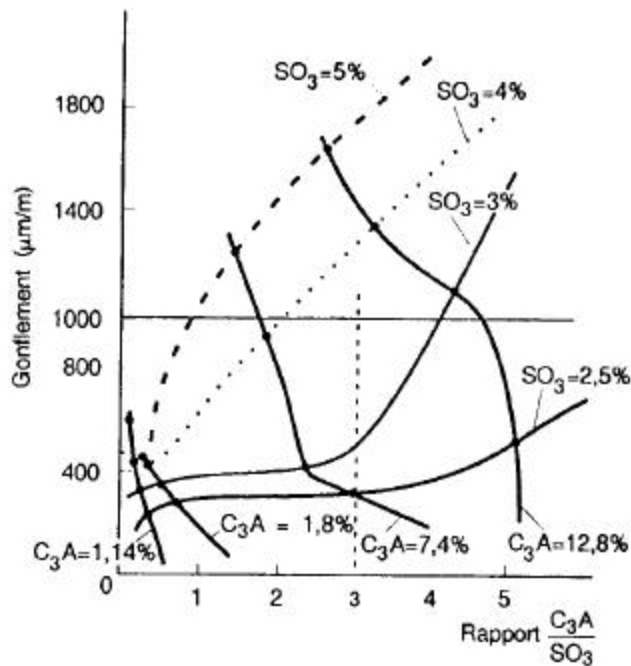


Fig 2.95 - Relation entre les teneurs en C₃A et SO₃ du ciment et le gonflement de mortiers conservés en eau de mer pendant un an.
 [Tiré de BARON J. et OLLIVIER J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 453 p.]

L'effet de la composition du ciment, et notamment du pourcentage de C_3A , est moins déterminant que la compacité du béton ²

2.4.3 Résistance aux autres types d'attaques chimiques

2.4.3.1 Les principaux types d'agents agressifs

- Gaz
 - Origine naturelle (CO_2)
 - Origine industrielle (S, N, vapeur de chlore, ...)

- Liquides
 - Ils peuvent contenir des ions agressifs (Cl, SO_3 , ...)
 - Ils peuvent avoir un pH relativement faible (< 12,5)

- Solides
 - Sols
 - Résidus industriels

La plupart du temps, les attaques chimiques surviennent lorsque les agents agressifs s'associent avec l'eau pour former une solution agressive qui peut pénétrer le béton (tout en entraînant d'autres substances corrosives: ions).

- **Le guide ACI 515.1R-16 présente une liste exhaustive du niveau d'agressivité d'un très grand nombre de substances.**

2.4.3.2 Mécanismes de base

- Dissolution

² Baron, J. et Ollivier, J.-P. 1992 La durabilité des bétons, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, France 450 p.

- Certains hydrates de la pâte de ciment hydraté sont **solubles** dans l'eau ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La portlandite se dissocie complètement en ions Ca^{2+} et OH^-

- Hydrolyse

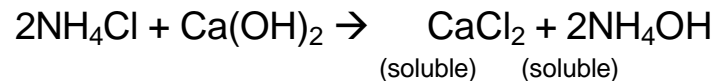
- Certains hydrates solubles dans l'eau **libèrent des ions** qui peuvent réagir avec l'eau pour ensuite produire des ions OH^- ou H^+ . **Le pH de la solution peut être modifié** (plus acide ou plus alcalin) et certains hydrates peuvent alors devenir **instables**.
- Le phénomène d'hydrolyse peut conduire à un lessivage ou «lixiviation» de la chaux des composés de la pâte de ciment durci provoquant une augmentation de la porosité et un affaiblissement du liant.
 - Lixiviation par les eaux acides.

- Échanges cationiques

- A) Formation de **sels de calcium solubles**

- Des substances acides contenant des anions pouvant former des sels de calcium solubles sont souvent présentes dans les environnements industriels
 - Ces substances acides peuvent réagir avec la portlandite pour former des **sels de calcium solubles** (chlorures de calcium, bicarbonate de calcium). **Lixiviation** → porosité plus grande, résistances mécaniques plus faibles.
 - Activités **industrielles** : Acides chlorhydrique, sulfurique et nitrique.
 - Produits **organiques** : Acides acétique, formique, carbonique et lactiques.

- **Fertilisants** : Chlorures d'ammonium et sulfates d'ammonium.



B) Formation de **sels de calcium insolubles ou non expansifs**

- Certains anions présents dans les eaux agressives peuvent réagir avec la pâte de ciment pour former **des sels de calcium insolubles ou non expansifs**.
- Ils ne causent **pas de dommages** en autant qu'ils ne soient **pas expansifs**.
- Ces produits peuvent être formés par la réaction entre la portlandite et les acides oxalique, tartarique, tannique, humique et phosphorique.

C) **Substitution des ions** calcium dans les C-S-H

- L'exposition prolongée du béton à une solution contenant des ions magnésium peut favoriser le **remplacement des ions calcium des C-S-H par des ions magnésium**. Cette substitution produit donc des **silicates de calcium-magnésium** hydratés ((C,M)-S-H) qui ont des **propriétés mécaniques relativement faibles**.

2.4.3.3 Prévention de l'attaque par les acides

- **Diminuer** la teneur en **Ca(OH)₂** du béton
 - **Liants avec pouzzolanes**
 - **Ciments avec laitiers**
 - **Ciments alumineux**

- **Diminuer la perméabilité** pour ralentir les échanges entre le milieu interne et le milieu externe.
 - Mûrissement approprié
 - Fumée de silice, cendres volantes
 - **Diminuer le rapport E/L**

2.4.4 Attaques par les bactéries

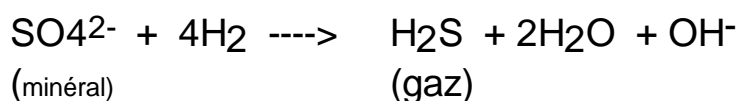
- Le béton peut être endommagé par certaines bactéries **pouvant produire (ou transformer) des substances corrosives.**
- La destruction peut survenir en raison de la production de certains **acides** (H₂S, H₂SO₄) ou suite à la formation de **produits expansifs** dans les sols ou dans le béton (soulèvement des dalles sur sol suite à la formation de gypse).

2.4.4.1 Mécanismes de base

- Il existe **deux principaux types** de bactéries pouvant être à l'origine de la détérioration du béton ³.
 - Milieu **anaérobique** : Desulfovibrio desulfuricans
 - Milieu **aérobique** : Thiobacillus concretivorus

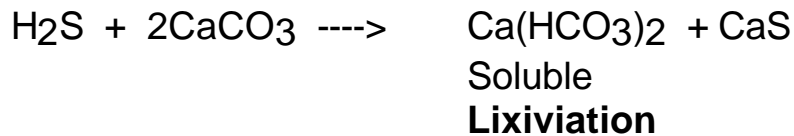
A) Bactérie sulfo-réductrice (Desulfovibrio desulfuricans)

- Production de H₂S



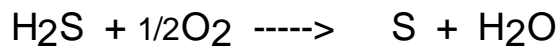
³ REGOURD M. 1983 *Durability, physico-chemical and biological processes related to concrete*, Durability of Concrete structures, CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, May, p. 49-71.

- **L'activité bactérienne** dans les effluents en milieu **anaérobie produit des sulfures**. Les sulfures sont ensuite transformés en hydrogène sulfuré (H₂S). **Le H₂S est très toxique et ça sent mauvais (!)**.
- Action du H₂S sur le béton (acide faible)

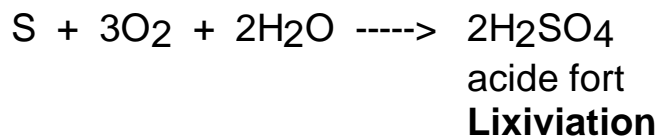


B) Bactérie produisant des sulfates (Thiobacillus concretivorus)

- Oxydation du H₂S (activité bactérienne)



- Oxydation du S (au contact de l'atmosphère)



2.4.4.2 Agressions de surface

- Au **coeur du béton**, les bactéries **anaérobiques** transforment les sulfates SO₄²⁻ et elles produisent du **H₂S qui est libéré vers la surface** (Fig 2.96). En **surface**, le H₂S est ensuite décomposé sous forme de S par les bactéries aérobiques. Le S est finalement **transformé en H₂SO₄** (un acide fort, très corrosif pour le béton).

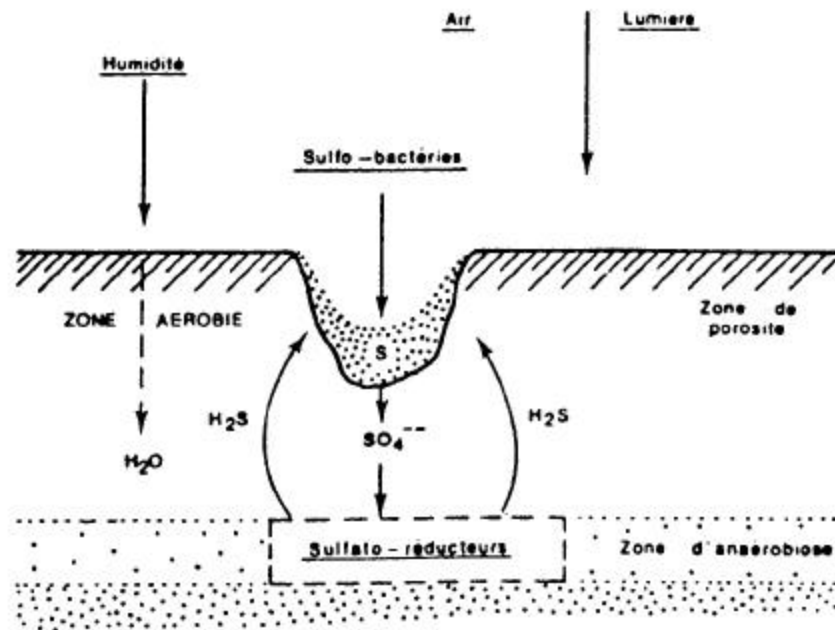


Fig 2.96 - Agression du béton par l'activité bactérienne.
 [tiré de: REGOURD M. 1983 *Durability, physico-chemical and biological processes related to concrete*, Durability of Concrete structures, CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, May, p. 49-71.]

Un type de destruction très similaire peut aussi se produire dans les égouts domestiques ou industriels (Fig 2.97).

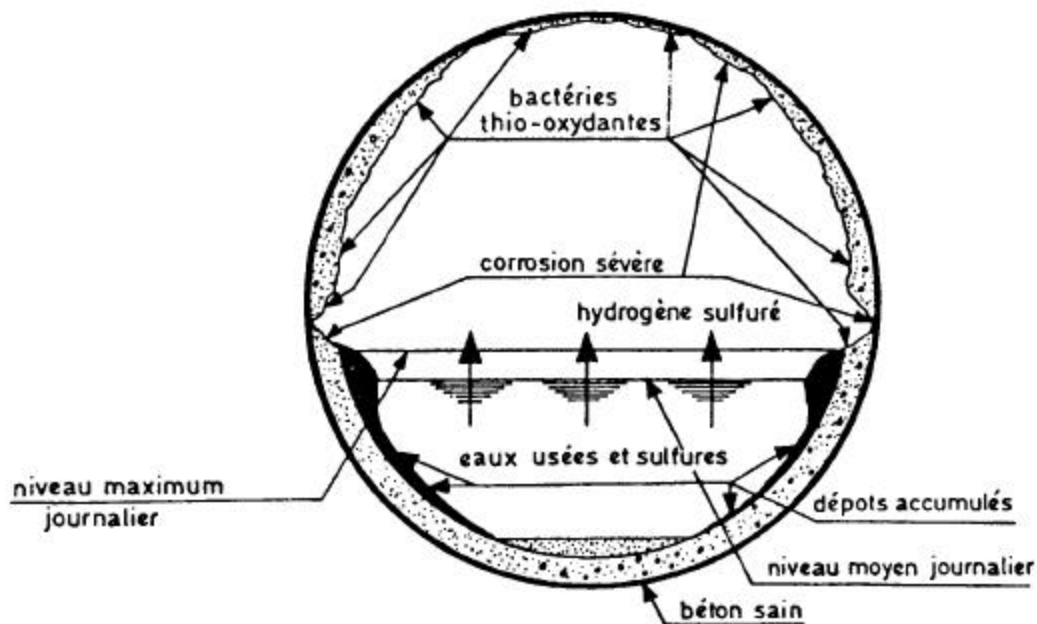


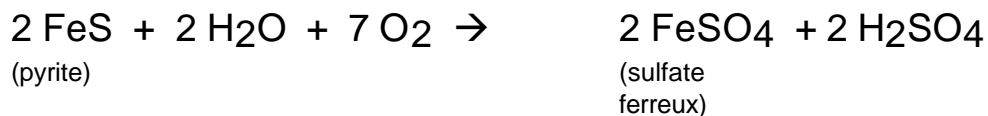
Fig 2.97 - Agression des surfaces de béton dans les égouts suite à une l'activité bactérienne.

[tiré de: REGOURD M. 1983 *Durability, physico-chemical and biological processes related to concrete*, Durability of Concrete structures, CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, May, p. 49-71.]

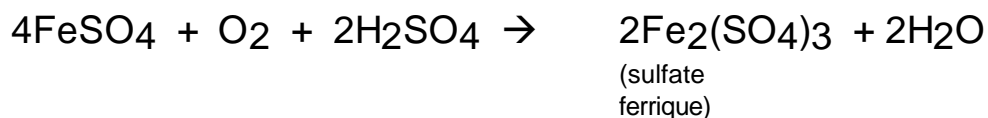
2.4.4.3 Agressivité et soulèvement des schistes argileux pyriteux

- **Les sols contenant des** shales pyritiques peuvent provoquer des **gonflements** importants et le dégagement **d'acide sulfurique**. Ces gonflements peuvent faire fissurer les dalles qui reposent sur ces sols et entraîner des **problèmes structuraux majeurs** ⁴. **L'acide sulfurique** attaque fortement les dalles de béton en contact avec ces sols.

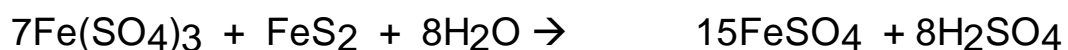
° En présence d'oxygène et d'eau acide:



- ° Dans l'environnement rendu plus acide par la formation d'acide sulfurique, la transformation du **sulfate ferrique** ne peut se faire par oxydation chimique. Cependant certaines **bactéries aérobiques** peuvent agir comme **catalyseur de l'oxydation des sulfures de fer**. La production d'acide sulfurique accentue l'activité bactérienne (Thiobacillus)

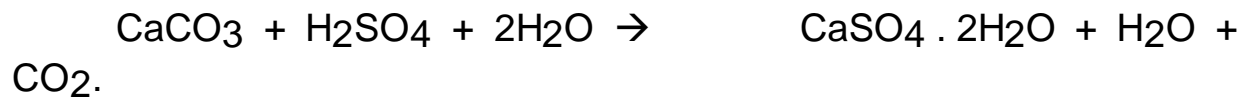


- ° Par la suite, les sulfates ferriques vont contribuer à oxyder un peu plus de pyrite et à produire **davantage d'acide sulfurique** qui alimente ainsi la réaction précédente (activité bactérienne - réaction en chaîne).

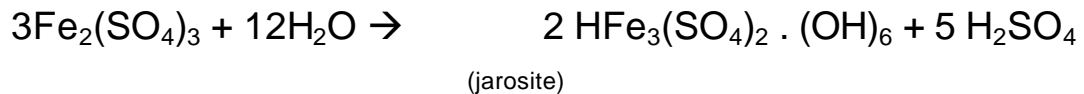


⁴ RAMACHANDRAN V.S.; FELDMAN, R.F. ET BEAUDOIN, J.J. 1981 *Concrete science - Treatise en current research*, Heyden, 427 p.

- ° L'acide sulfurique attaque ensuite la calcite présente dans la pierre concassée pour produire du gypse et de la jarosite (gonflement).



Expansion, soulèvement



- ° La **précipitation du gypse et de la jarosite** dans les pores et dans les fractures de la roche engendre alors un **gonflement du sol**.
- ° Le **gypse** se retrouve souvent sous forme de **cristaux plats** en forme de lamelles cristallisant **parallèlement à l'orientation des feuillets d'argile ou des plans de fracture**.
- ° La **jarosite** est un minéral de **couleur jaune** qui tapissent les plans de fracturation ou qui remplissent l'espace entre les cristaux de gypse. La jarosite constitue un **bon indicateur de la présence de bactéries car c'est un produit d'une réaction biochimique**.

- **Influence des facteurs environnementaux et physico-chimiques**

- **L'oxygène** peut être présent sous forme gazeuse ou il peut être dissout dans l'eau.
 - L'oxygène peut pénétrer via les fractures ou les fissures dans le massif rocheux.
 - Abaissement de la nappe phréatique par le système de drainage.
- La **présence d'humidité** est essentielle à la formation d'acide sulfurique.
- La **surface spécifique des grains de pyrite**. La forme cristalline framboïdale est la plus problématique en raison de sa surface spécifique plus élevée.
 - Une teneur en pyrite (framboïdale) aussi faible que 0,1% peut causer des problèmes.
- Les **températures constantes et élevées** sous les dalles des bâtiments sont propice à l'activité bactériologique.

- **Attaque du béton par les sulfates et par l'acide sulfurique**

- **Formation de gypse et d'ettringite secondaires** (voir section 2.4.1.2)
- La présence de **thenardite** (Na_2SO_4) sous l'aspect d'un dépôt blanchâtre mal cristallisé dans le béton est un **bon indicateur de la présence de sulfates dans le béton**.
 - La thénardite est un produit de la réaction entre les alcalis (Na^{2+}) de la pâte de ciment et les ions SO_4^{2-} .