

LA DURABILITE DES BETONS

Pathologies

S. Rémond

Objectifs des 3 séances

1. Connaître les principaux mécanismes physico-chimiques impliqués dans la dégradation du béton armé.
2. Savoir identifier les différentes pathologies du béton armé et connaître les mécanismes spécifiques de dégradation dans chaque cas.
3. Connaître la démarche et les techniques d'analyses à utiliser pour l'investigation d'un matériau dégradé et les principes de l'approche performantielle de la durabilité.

Dégradations d'origine chimique

Corrosion des aciers et des métaux

Introduction

La corrosion des métaux touche **tous** les secteurs **industriels**.

⇒ Coût de la corrosion en France estimée à **1 milliard** d'Euros / an

Dans le domaine du **génie civil**, la corrosion touche certains **éléments totalement métalliques** (pieu, palplanche, tuyau, ...), mais surtout le **béton armé** représentant pratiquement **80%** des problèmes de **durabilité du béton**.

Corrosion des armatures du béton

✓ En règle générale, le béton **protège physiquement** et **chimiquement** les armatures en acier de la corrosion, mais sous certaines conditions.

✓ **Cas d'ouvrage** corrodés **nombreux**

Ex : 4 ponts routiers en béton armé sur 10 en état déficient aux Etats-Unis (OCDE).

➔ La corrosion des armatures dans le béton armé apparaît comme étant le défaut le plus fréquent.

✓ La corrosion des armatures est la conséquence de différents phénomènes :

1. **carbonatation** du béton d'enrobage,
2. **lixiviation** du béton d'enrobage,
3. **pénétration** des **chlorures** jusqu'au niveau des armatures,
4. **effet additionnel** des **micro-organismes**.

Corrosion des armatures du béton

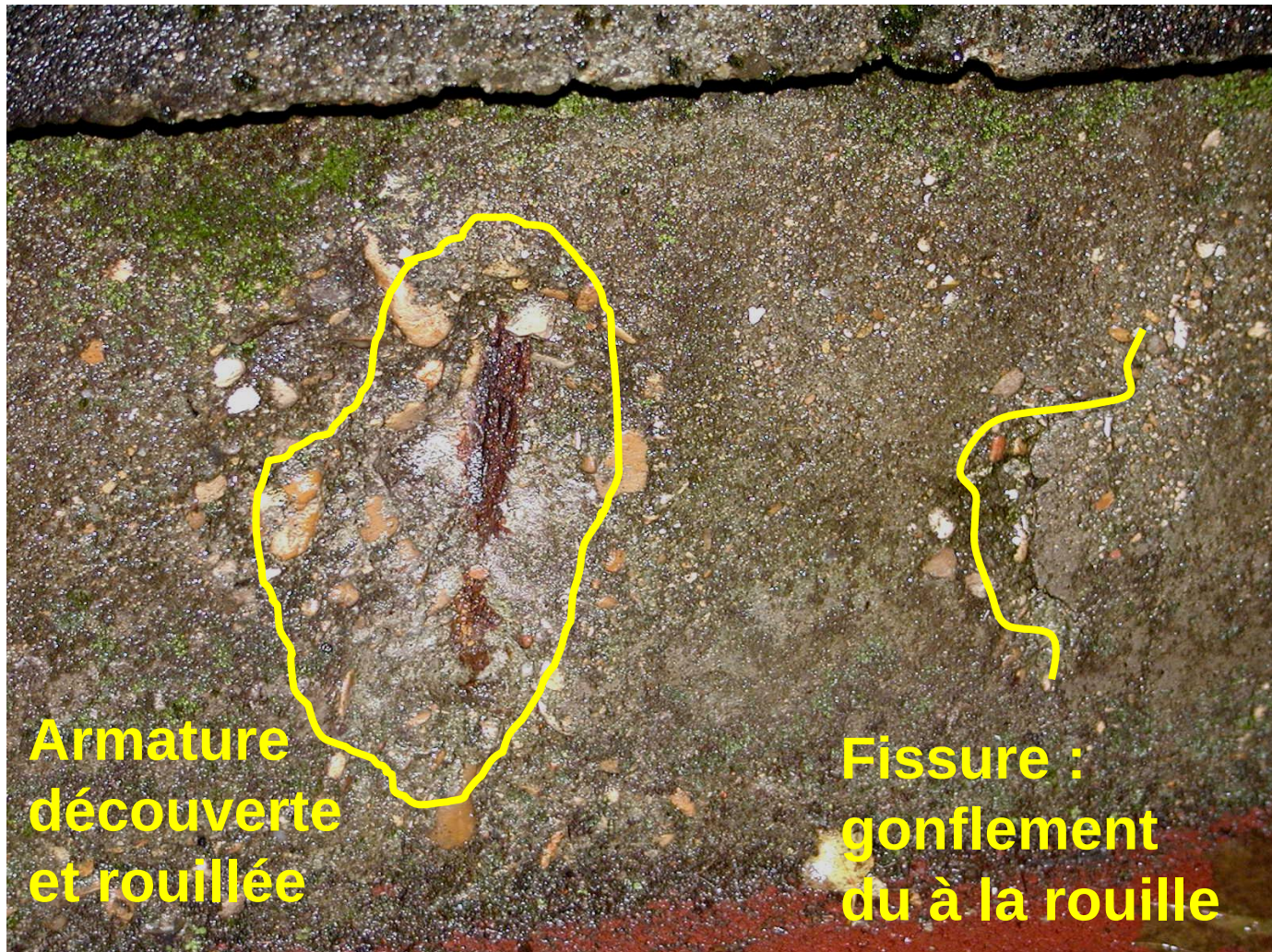
Différents stades d'avancement de la pathologie :

- Apparition des **premières fissures** parallèles aux armatures



Corrosion des armatures du béton

Différents stades d'avancement de la pathologie :



**Armature
découverte
et rouillée**

**Fissure :
gonflement
du à la rouille**

Corrosion des armatures du béton

Différents stades d'avancement de la pathologie :

- **Délamination** des morceaux de béton



Corrosion des armatures du béton

Conséquences :

1. Détérioration de l'**aspect extérieur** (dans les cas les plus graves)
2. Détérioration de l'**étanchéité** → **Infiltration** d'eau
3. **Chutes** de morceaux de **béton** → Problèmes de **sécurité**
4. **Diminution** de la **capacité portante** de la structure (due à la réduction de la section d'acier ...),



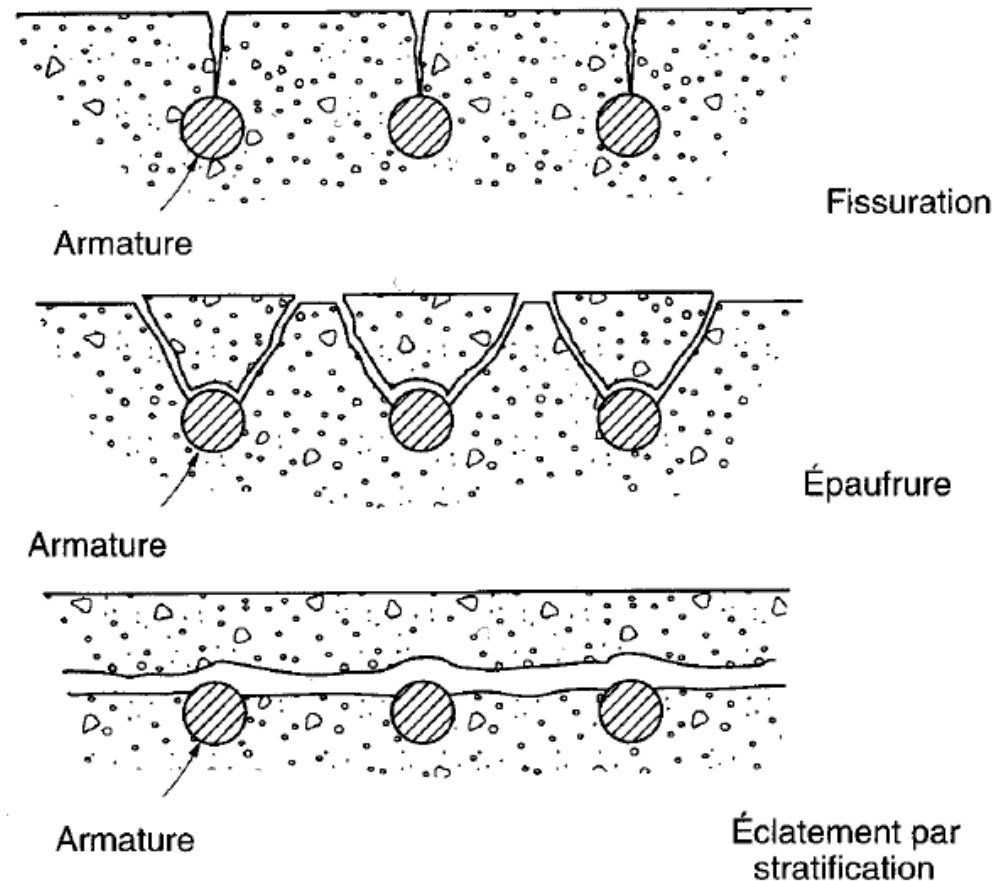
Effondrement d'un parking suite à la corrosion de ses armatures (USA)

Comment le béton protège l'acier?

- ✓ Dans les conditions normales, les armatures enrobées de béton sont **protégées** de la **corrosion** par un phénomène de **passivation**, résultant de la création, à la surface du métal, d'une fine **pellicule protectrice** de **ferrite Fe_2O_3** .
- ✓ Cette pellicule est **stable** tant que la présence de **portlandite** ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) maintient la **basicité** du milieu entourant les armatures.
 - ➔ Le **film passif disparaît** lorsque le **pH** est **compris** entre **9 et 11** selon les conditions.
- ✓ Plusieurs **agents** peuvent **neutraliser** cette **protection** : **CO_2** , **Cl^-** , **eau pure** (lixiviation).
- ✓ Le milieu basique du béton ($\text{pH} > 13$) se trouve progressivement modifié par la **neutralisation** de l'**alcalinité** du ciment pour atteindre un **pH** de l'ordre de **9**, n'assurant **plus** la **protection** des **armatures** et entraînant une **dépassivation** de l'**acier**.

Effet des produits de corrosion sur la microstructure

L'**augmentation** de **volume** induit des **contraintes** dans la matrice puis des **fissurations** et un **éclatement** du béton au niveau des armatures corrodées.



Dépassivation par carbonatation

Mécanisme

- ✓ L'air contient du dioxyde de carbone à un taux moyen de 0,03% en volume.
- ✓ Le dioxyde de carbone atmosphérique réagit avec les différents hydrates, et principalement avec la **portlandite** du béton, pour donner du **carbonate de calcium** selon l'équation suivante :



- ✓ La réaction conduit à une **diminution du pH** de la solution interstitielle contenue dans la porosité du béton : passage d'un **pH > 13** à un **pH** de **9** environ.
- ✓ La **cinétique de diffusion** de CO_2 dans la porosité suit la **seconde loi de Fick** et donc le CO_2 progresse dans le matériau en fonction de la racine carré du temps.

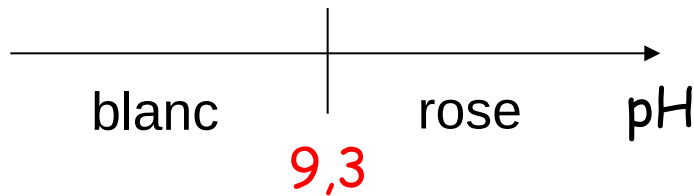
$$x_{\text{carbonaté}} = a \times \sqrt{\text{temps}}$$

$x_{\text{carbonaté}}$ = épaisseur dégradée à l'instant t
 a = constante

Dépassivation par carbonatation

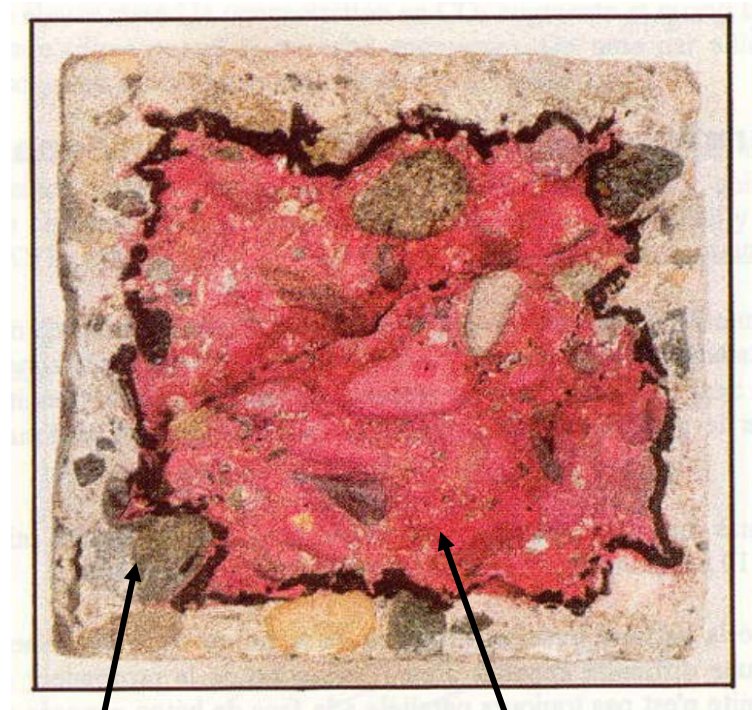
Estimation de la profondeur carbonatée par le test à la phénolphtaléine (indicateur coloré) :

Zone de virage de la phénolphthaléine :



- Zone carbonatée : zone blanche
- Zone non carbonatée : zone rose

Profondeur de carbonatation



Zone carbonatée

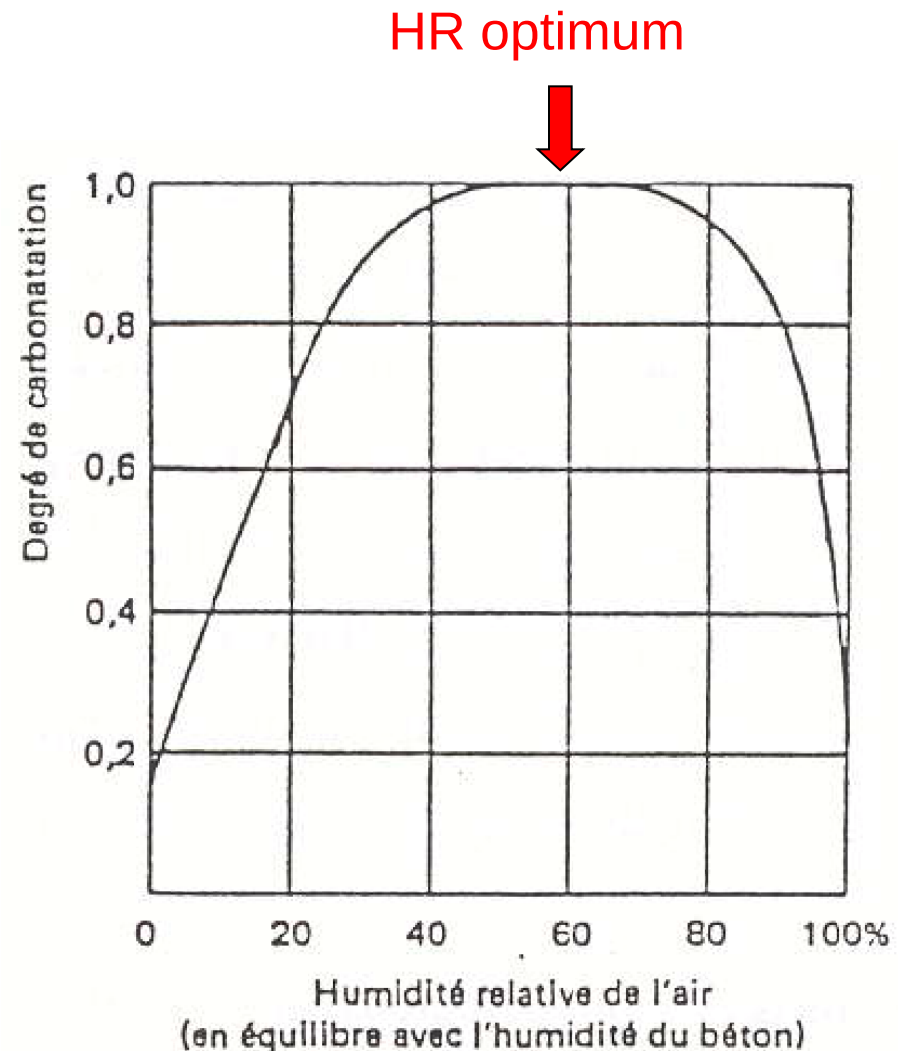
Zone non carbonatée

Paramètres influençant la cinétique de carbonatation

Humidité relative

- Si la **porosité** est **remplie d'eau**, la **carbonatation** est **faible** car le coefficient de diffusion de CO_2 dans l'eau est nettement plus faible que dans l'air
- Inversement, si le béton se trouve dans un milieu **sec**, la quantité d'eau est **insuffisante** pour dissoudre le dioxyde de carbone.

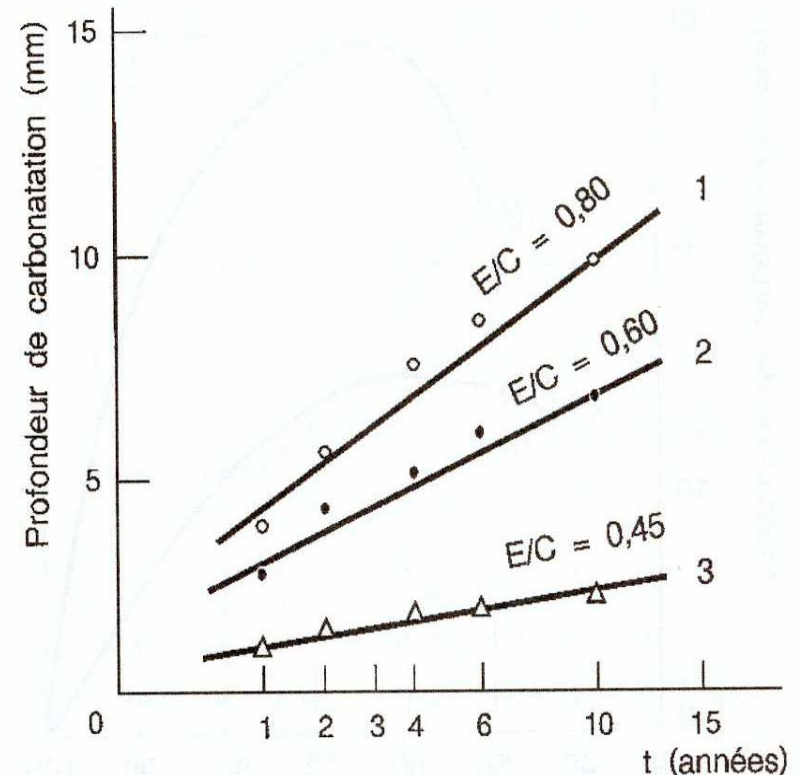
L'optimum d'HR pour une carbonatation maximale est située aux alentours de 60%



Paramètres influençant la cinétique de carbonatation

Qualité du béton

- ✓ Les différents facteurs propres à la **composition du béton** influent sur l'**épaisseur carbonatée**.
- ✓ La **profondeur** de carbonatation ↗
 - quand le **dosage en ciment** ↘
 - quand le rapport **E/C** ↗
(microstructure avec plus de porosité).
- ✓ La diminution du temps de cure augmente la profondeur de carbonatation



Corrosion par pénétration des chlorures

Sources d'ions chlorure

✓ Le problème de l'attaque du béton par les chlorures survient habituellement lorsque des ions chlorure proviennent de l'extérieur :

- sels fondants de déverglaçage
- eau de mer

✓ Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de **granulats contaminés**, d'**eau de mer**, d'**eau saumâtre** ou d'**adjuvants** contenant des chlorures (CaCl_2 : accélérateur usuel de l'hydratation).

➔ **Aucun de ces matériaux ne devrait être autorisé dans la confection de béton armé.**

✓ Les normes limitent généralement de manière très sévère la teneur en ions chlorure du béton.

➔ La **limite** de la **teneur totale en ions chlorure** d'un béton armé est de **0,40%** de la masse du ciment (norme européenne ENV 206-1992).

Corrosion par pénétration des chlorures

Deux types d'ions chlorure :

✓ **Chlorures libres :**

Ils se trouvent sous forme **ionique** dans la solution interstitielle

Ils sont **extractibles** à l'eau et sont donc appelés « **chlorures solubles dans l'eau** »

✓ **Chlorures totaux :**

Ils incluent ceux **fortement adsorbés** sur les **C-S-H** et ceux **chimiquement liés** dans la matrice cimentaire sous forme de composés tels que les chloroaluminates de calcium

On considère que **seuls les chlorures libres** peuvent diffuser et jouer un **rôle actif** dans les processus de **dépassivation** et de **corrosion** des armatures

Corrosion par pénétration des chlorures

Mécanisme

- ✓ La vitesse de corrosion de l'acier dans le béton est plus élevée en présence d'ions **chlorure**, qui agissent comme un **catalyseur**.
- ✓ Un premier effet des ions chlorure se manifeste au niveau de la surface métallique par un **mécanisme d'amorçage de la corrosion** : la dépassivation de la couche superficielle pouvant s'amorcer par une **dissolution** de la **couche passive** ou encore par **migration** des chlorures à travers le film de ferrite.
- ✓ Le deuxième effet des ions chlorure est de **diminuer la résistivité** de la solution électrolytique dans le béton (même effet avec un E/C élevé, taux d'humidité et température élevés) : ➔ **courant de corrosion plus élevé** et donc plus de **dissolution** du **métal**.

Comment limiter la corrosion des armatures d'un ouvrage ?

En pratique, on doit faire en sorte que la **période d'amorçage** (ou d'incubation) soit **la plus longue possible** :

1. **Fabriquer un béton de qualité** avec une **faible perméabilité** donc avec de **faibles E/C** pour réduire la pénétration de CO_2 , O_2 , H_2O et Cl^- .
2. **Respecter les épaisseurs d'enrobage** indiquées dans les normes (épaisseur dépendant des conditions environnementales).

Réactions Alcalis-Granulats

La réaction alcali-granulats **représente des réactions chimiques des granulats dans les bétons,**

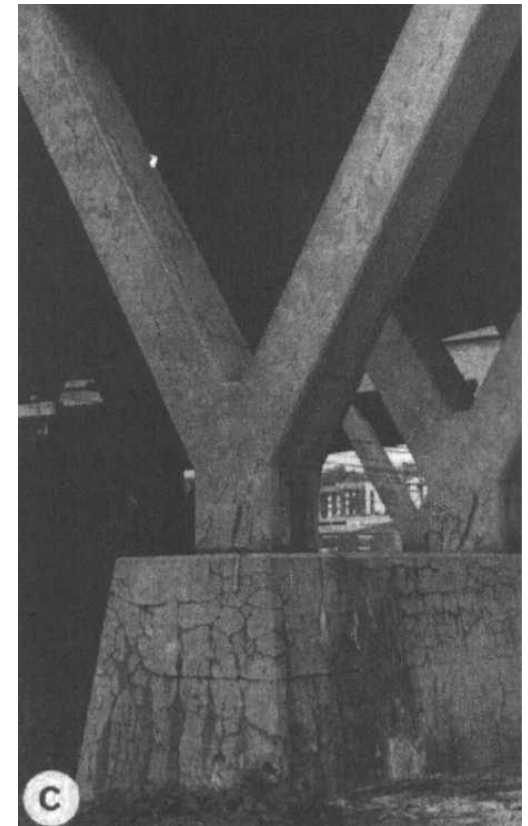
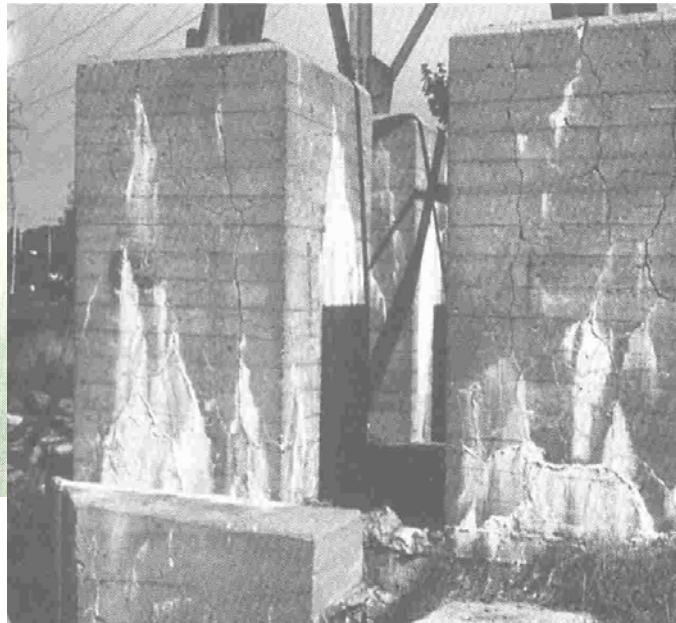
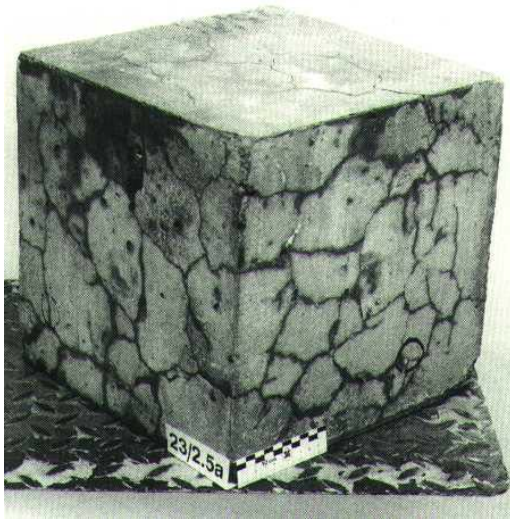
On distingue en fait trois types :

- alcalis-silice,
 - alcalis-silicates,
 - alcalis-carbonates.
- 
- Alcali-réaction (RAS)**

Le troisième type est à considérer séparément des deux premiers : réaction très rare. Elle ne génère pas de gels siliceux expansifs mais semble aboutir à un gonflement de minéraux argileux (formation de calcite, et de brucite, minéraux stables et insolubles).

Pathologie RAS

1. Pathologie expansive à cinétique lente
découverte dans les 30-40 aux Etats-Unis



Pathologie RAS

Les désordres se manifestent par :

1. Une fissuration en faïençage
L'ouverture des fissures peut atteindre 0,5 mm par an
2. Des exsudations formées de calcite et de gels de silicates alcalin
3. Des pustules ou cratères appelés aussi pop-outs
4. Coloration ou décoloration le long des fissures
5. Expansion du béton entraînant des mouvements et déformations



Parfois destruction de l'ouvrages
Réparations coûteuses



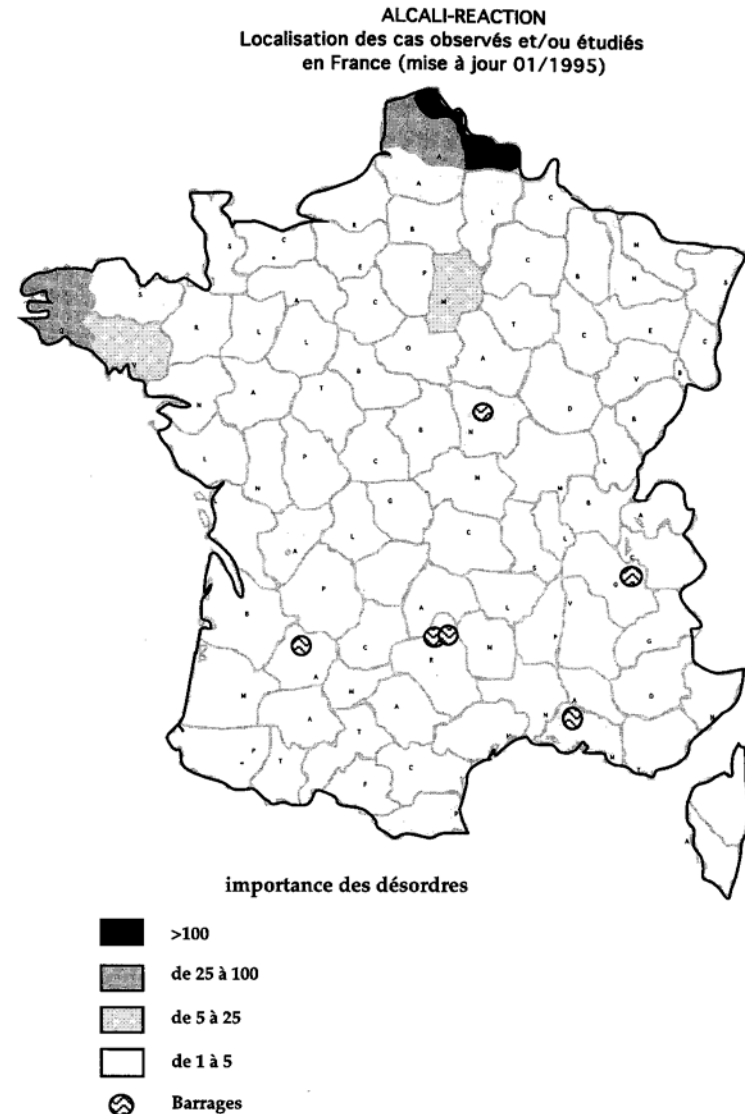
Pathologie RAS



Pathologie RAS

2- Problématique mondiale
: Europe, Chine, Usa,
Afrique du sud ...

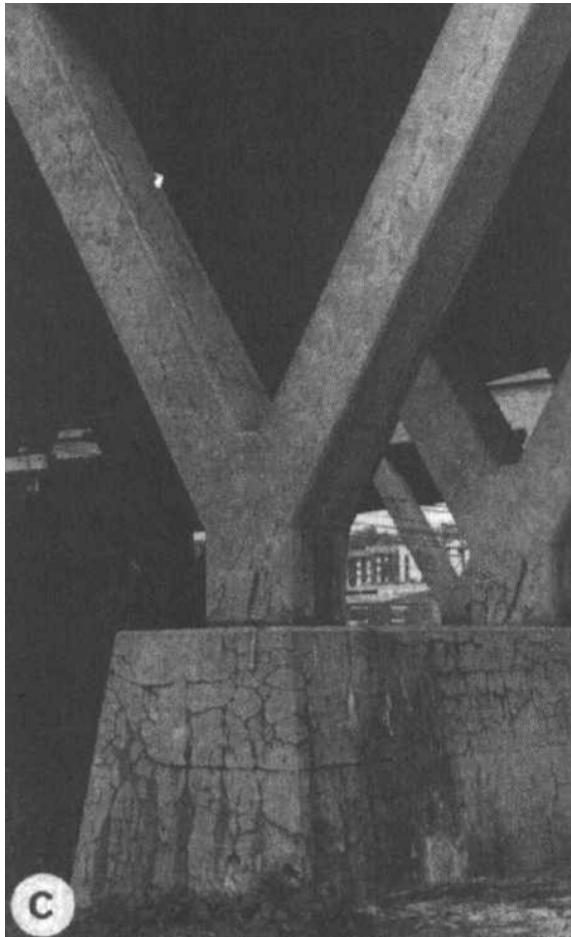
France : de l'ordre de 400
ouvrages atteints dont
6 barrages.



Pathologie RAS

3 – Conséquences pour l'ouvrage

- l'ouvrage devient plus sensible aux agressions externes : gel-dégel, carbonatation, corrosion des armatures ...



Pont de la ville de Québec
soumis à la RAS + Gel Dégel
Date de la construction :
1966

=> Pathologie qui peut mettre plusieurs
dizaines d'années avant d'être observée
macroscopiquement

Pathologie RAS

4- Scénario le plus fréquent

Attaque par les **alcalins du ciment** du **réseau siliceux** de phases minérales **des granulats** du béton :

→ processus chimique d'altération à la base de l'expansion puis de la fissuration

De plus l'environnement doit être humide (au moins 70% d'hygrométrie interne pour le béton)

Processus multi-échelle :

- 1 réseau siliceux,
- 2 granulat,
- 3 composite granulaire béton.

Évolution des caractéristiques des bétons dégradés

- Expansion du béton et fissuration
- Chute des résistances mécaniques :
 - en compression (40 à 60%)
 - en traction (65% à 80%)
 - Module élastique (60 à 80%)
- Expansion est réduite en présence d'armatures
- Le béton se fissure pour des expansions supérieures à 0,1%

Réglementation / Prévention

Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (LCPC, 1991), s'appuient sur des essais qui font l'objet de normes ou de fascicules de documentation :

P 18-557 Granulats – Éléments pour l'identification des granulats

P 18-584 Granulats – Réactivité potentielle de type alcali-silice

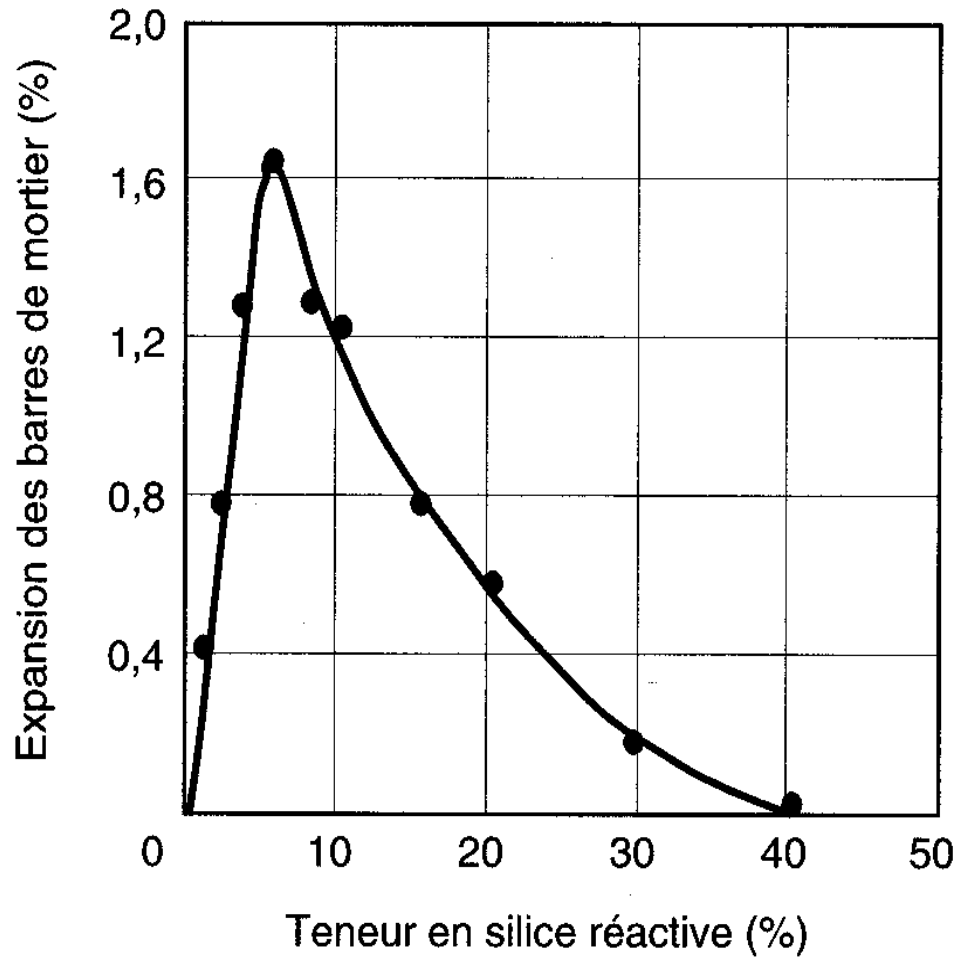
P 18-585 Granulats – Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin – Essai sur mortier

P 18-587 Granulats – Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin – Essai sur béton

P 18-588 Granulats – Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin – Essai accéléré sur mortier MICROBAR

...

Réglementation / Prévention



Il existe une teneur **pessimum** en silice qui est plus élevée pour de plus faibles rapports eau/ciment et de plus forts dosages en ciment (plus d'alcalins).

A des teneurs en silice plus élevées, la surface exposée du granulat réactif est grande, ainsi la quantité d'alcalins disponibles par unité de surface est plus faible et moins la réaction alcali-silice peut se produire.

Réglementation / Prévention

Modification des formules :

- 1 - Utiliser des ajouts pouzzolaniques (fds, métakaolins, cendre volante ...) ou du laitier de haut fourneau vitrifié moulu pour générer des C-S-H « pouzzolaniques » dont les silanols (SiH_4O) accessibles peuvent neutraliser les alcalins réactifs
- 2 – Consommer une partie du réservoir d'ions hydroxyles de la Portlandite (pas notable pour les laitiers)
- 3 – Faire des microstructures moins perméables à l'eau
- 4 - Baisser l'alcalinité du béton si on substitue l'ajout au clinker

Attaques sulfatiques

1. attaque **externe** par des **ions sulfates** **contenus dans l'environnement** : sol, eau de mer, oxydation de pyrite ...
2. attaque **interne** par des **ions sulfates** **contenus dans la pâte de ciment ou les granulats**,
3. attaque par des ions sulfates et carbonates.

Attaque externe par les sulfates

Les sulfates représentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton le plus souvent au contact des sols (pieux...)

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles.

Les sulfates sont présents naturellement dans les sols où ils constituent un élément nutritif important des plantes.

Leur concentration y est habituellement assez faible : en moyenne entre 0,01 et 0,05 % en masse du sol sec.

Il n'est pas rare de rencontrer des valeurs beaucoup plus élevées (supérieures à 5 %) dans certaines régions où le sous-sol peut contenir du gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou de l'anhydrite, CaSO_4 . C'est le cas, par exemple, du bassin parisien...

Attaques sulfatiques



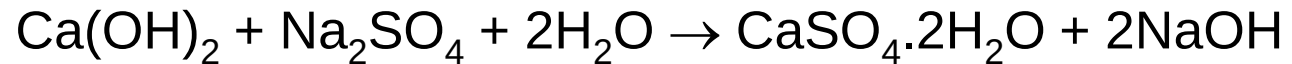
Photo J. Marchand, 2000

Dégradation du béton
Attaque sulfatique

Processus d'attaque externe par les sulfates seuls

a) Formation de gypse

Réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate comme par exemple, avec le sulfate de sodium :



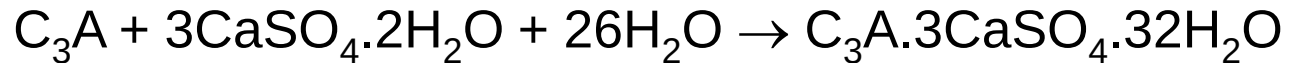
Si la concentration locale en ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} dans la phase liquide interstitielle du béton excède le produit de solubilité du gypse, ce dernier précipite. *Le volume du solide précipité représente un peu plus du double de celui des produits de départ et une expansion peut se manifester.* Mais, dans la majorité des cas, cette réaction reste limitée dans la mesure où le gypse se forme préférentiellement dans les espaces libres de la pâte de ciment durcie.

Processus d'attaque externe par les sulfates seuls

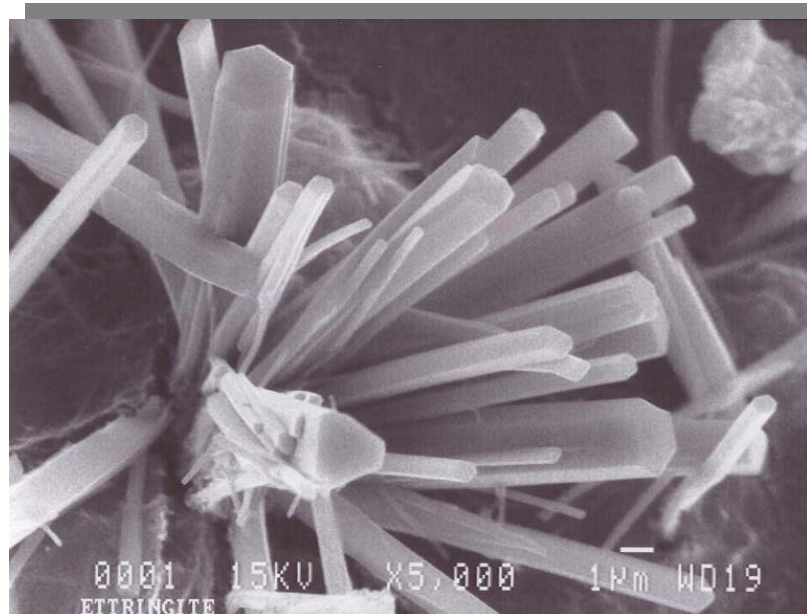
b) Formation d'ettringite

Réactions entre ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} et les aluminates de calcium du ciment formant l'**ettringite** :

- soit à partir de reliquats de C_3A anhydre :



- soit à partir du monosulfoaluminate de calcium $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ou du monocarboaluminate de calcium $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$.



Processus d'attaque externe par les sulfates seuls

Suivant la composition de la phase liquide, en particulier de la teneur en chaux, l'espace disponible, la cristallisation de l'ettringite peut être expansive ou non :

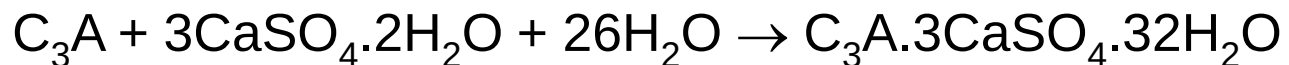
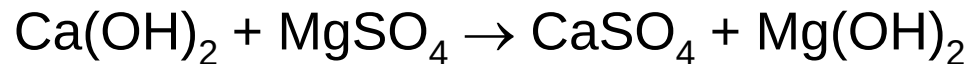
- Pour une concentration en sulfate de calcium donnée, la sursaturation de la solution interstitielle est d'autant plus grande que le milieu est riche en Ca^{2+} et OH^- .
- La pression de cristallisation est d'autant plus élevée que la sursaturation est grande.
- De plus, le volume d'ettringite formée à partir de C_3A ou de momosulfoaluminate de calcium est supérieur à celui des réactifs initiaux.

Ceci peut conduire en fonction des conditions et de la microstructure, une expansion, qui engendre une fissuration du béton.

Processus d'attaque par les sulfates seuls : importance du cation

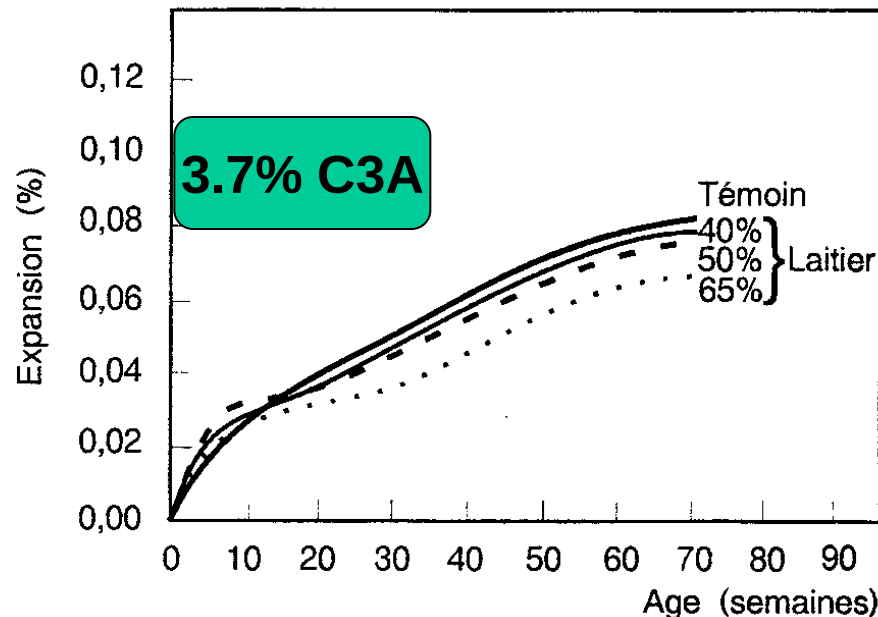
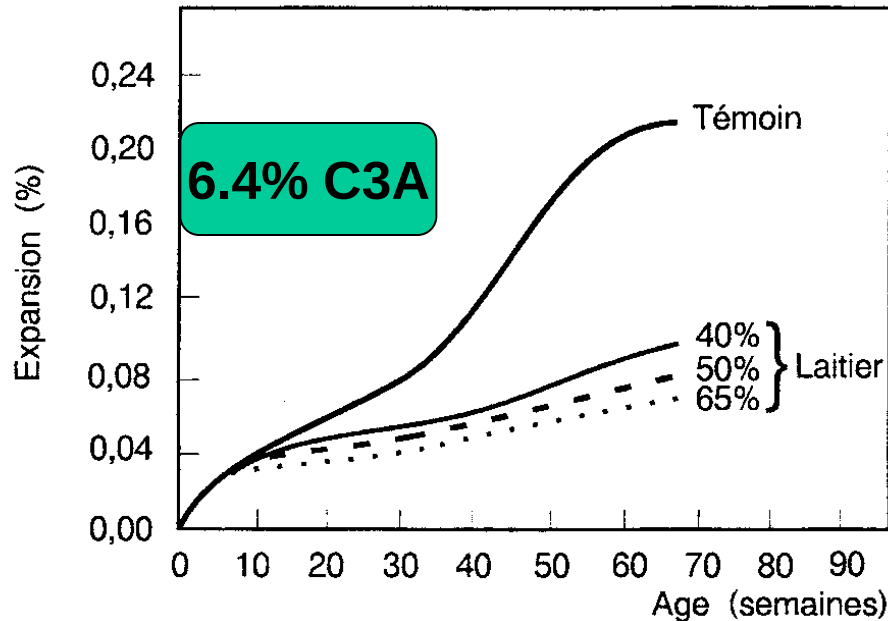
Les sulfates les plus agressifs vis-à-vis du béton sont les sulfates de magnésium, d'ammonium, de calcium et de sodium.

Le **sulfate de magnésium** est très fortement agressif par la double action du cation Mg^{2+} qui s'échange avec Ca^{2+} et l'anion SO_4^{2-} suivant les réactions :



- la formation d'une couche protectrice **brucite** Mg(OH)_2 peut ralentir **temporairement** la pénétration des sulfates,
- le **silicate de magnésium hydraté M-S-H** n'a pas de propriétés liantes.

Eaux sulfatiques : choix du ciment



Les additions minérales de laitiers, de pouzzolanes naturelles et de fumées de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates (**attention aux apports potentiels de Al_2O_3**).

- Effet de dilution : moins de C_3A
- Moins de perméabilité par réaction pouzzolanique
- Moins de Ca^{2+} et OH^- disponible car moins de CH : sursaturation plus faible pour ettringite

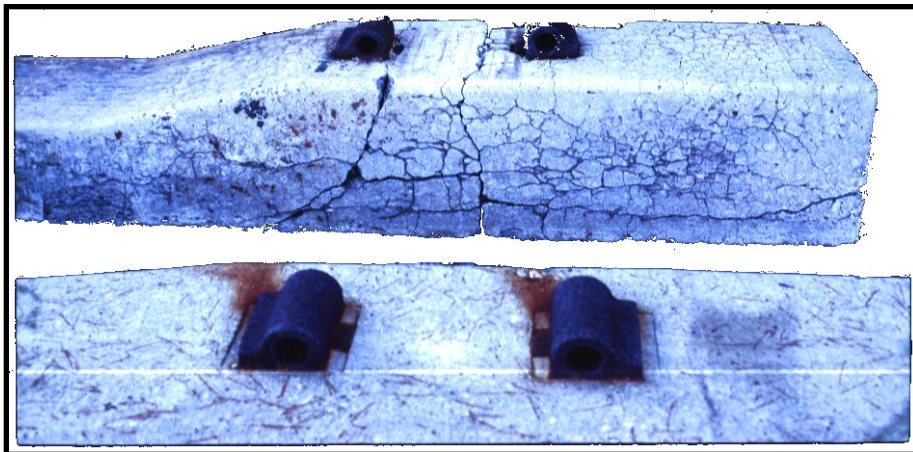
Attaque interne: Formation différée d'ettringite (DEF)

Gonflement d'origine interne qui peut mener à une dégradation macroscopique du béton par fissuration dans la masse

Cas d'occurrences (**rare**s) :

1. Pièces préfabriquées traitées thermiquement
2. Pièces massives d'ouvrage coulées en période estivale

Ex. n°1 : traverses de chemin de fer

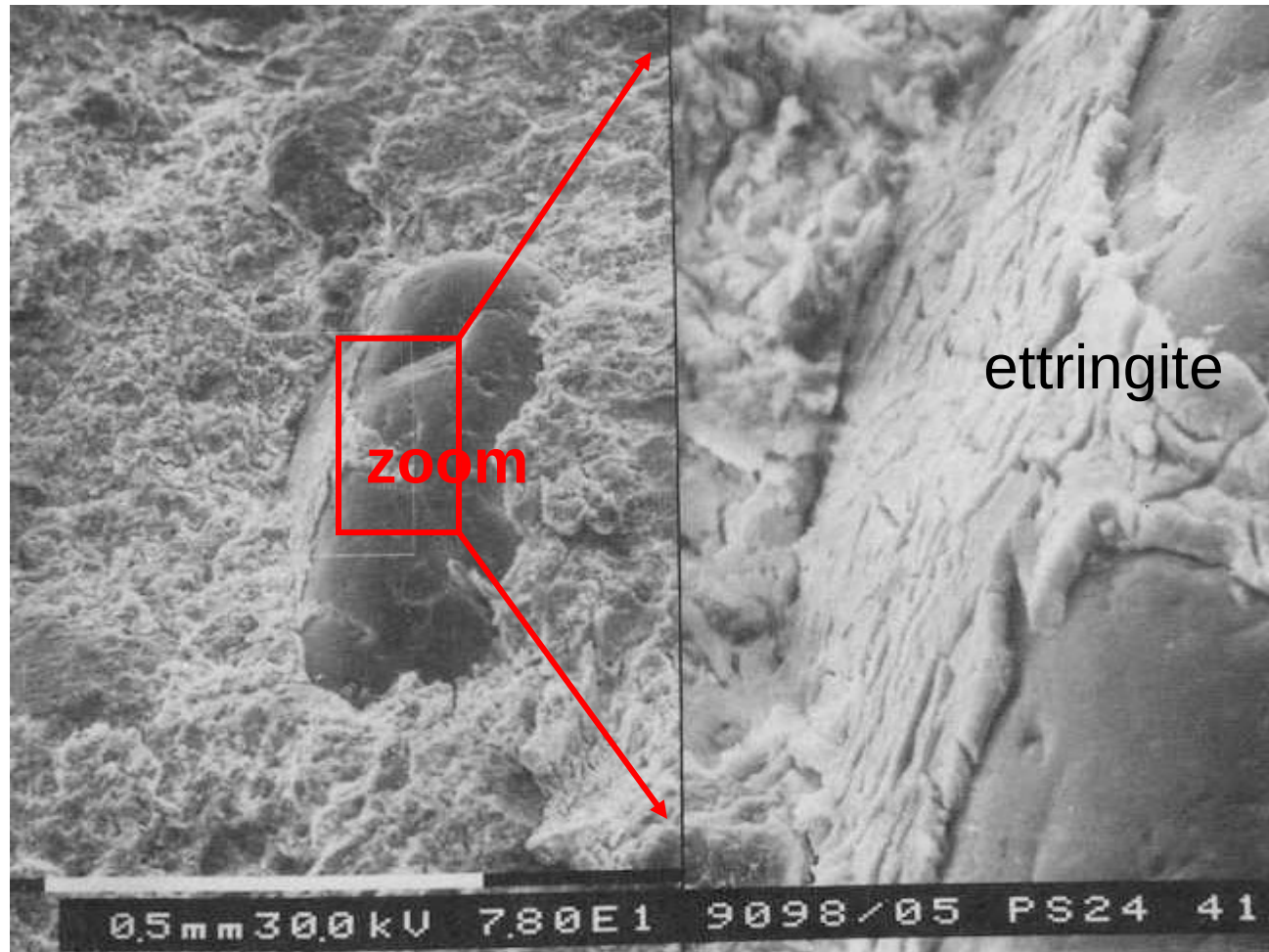


Ex. n°2 : chevêtre de pont

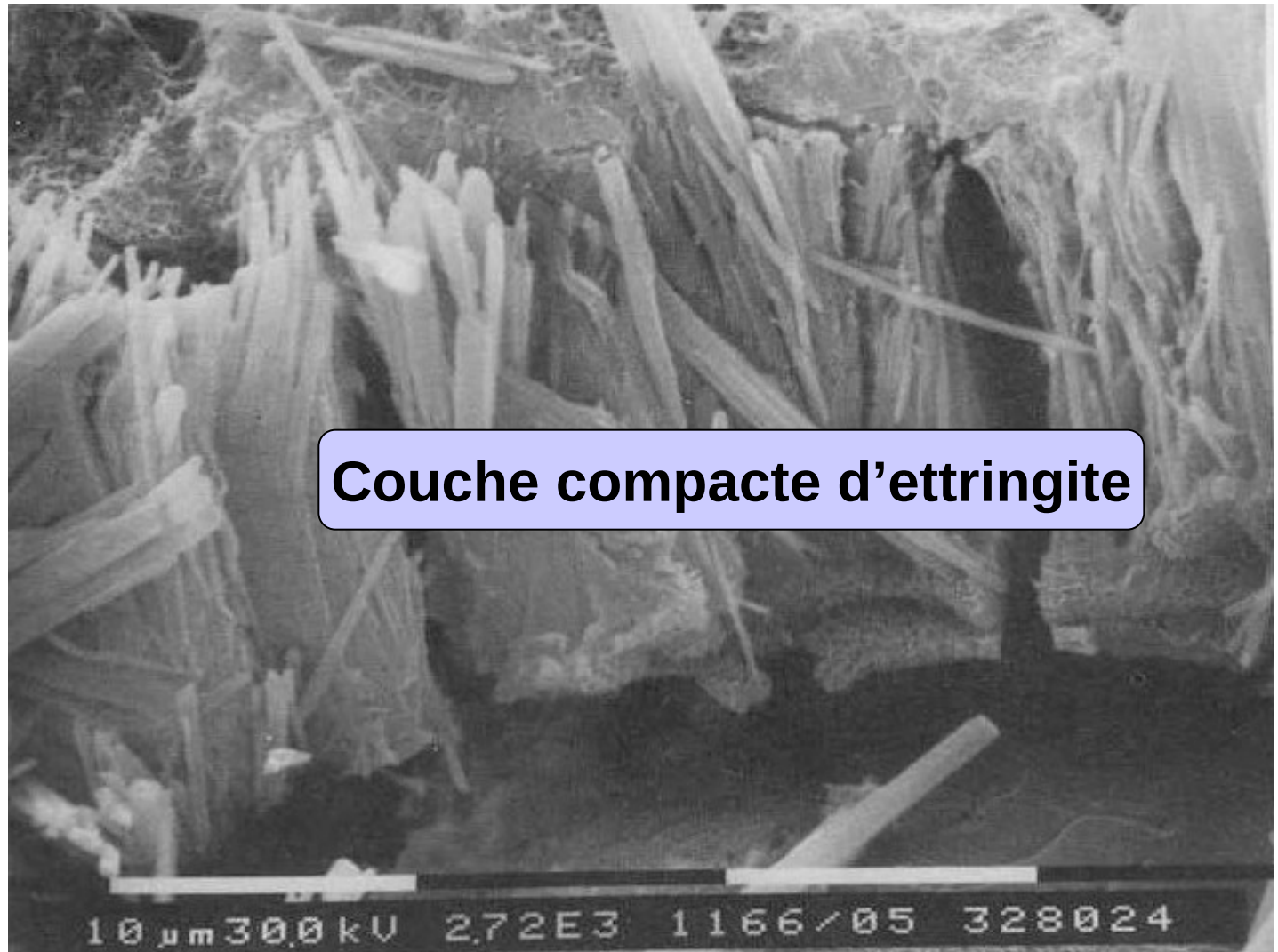


Attaque interne: Formation différée d'ettringite (DEF)

Symptômes à l'échelle microscopique : Précipitation massive d'ettringite aux interfaces pâte / granulat et plus généralement dans les fissures du béton



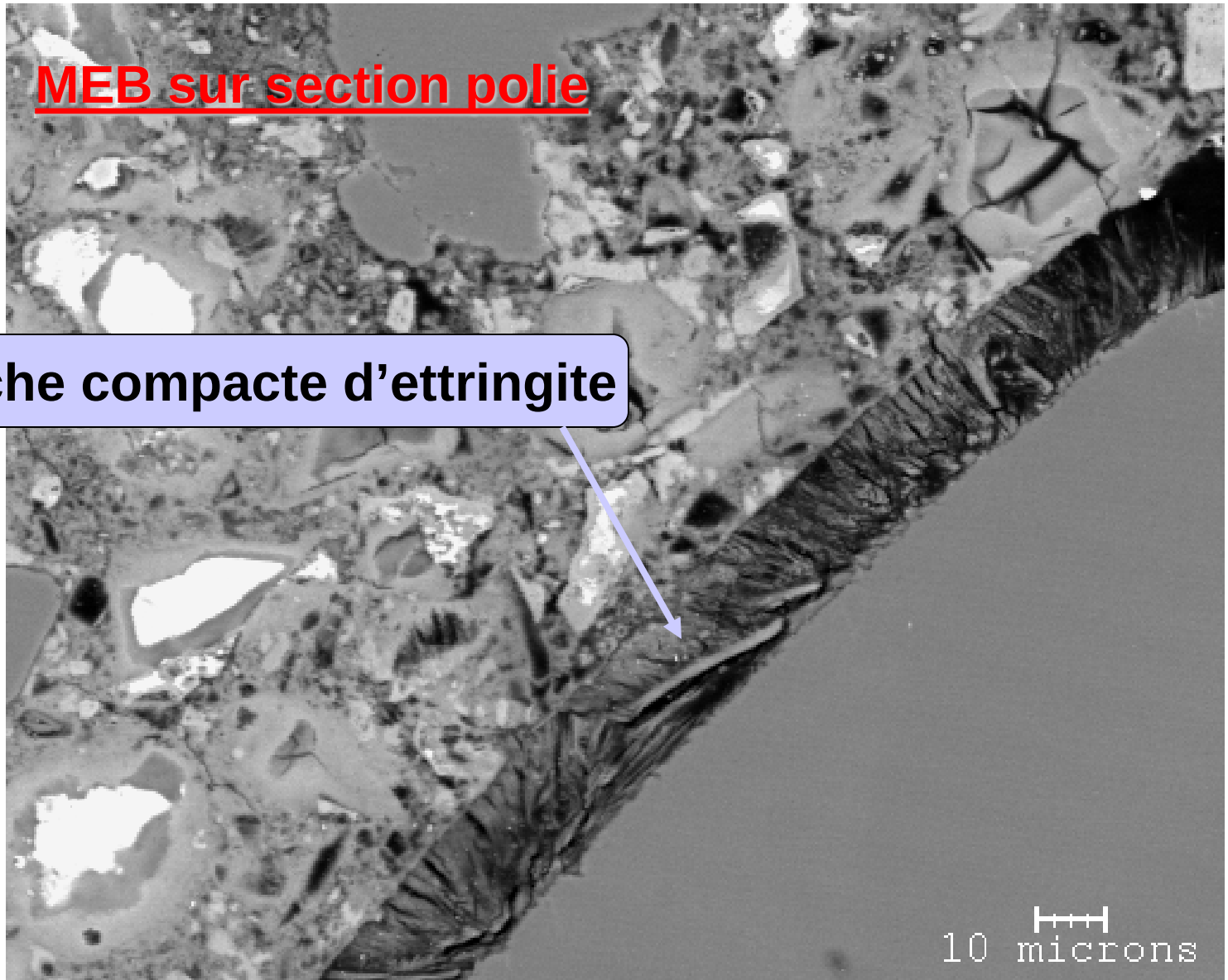
Attaque interne: Formation différée d'ettringite (DEF)



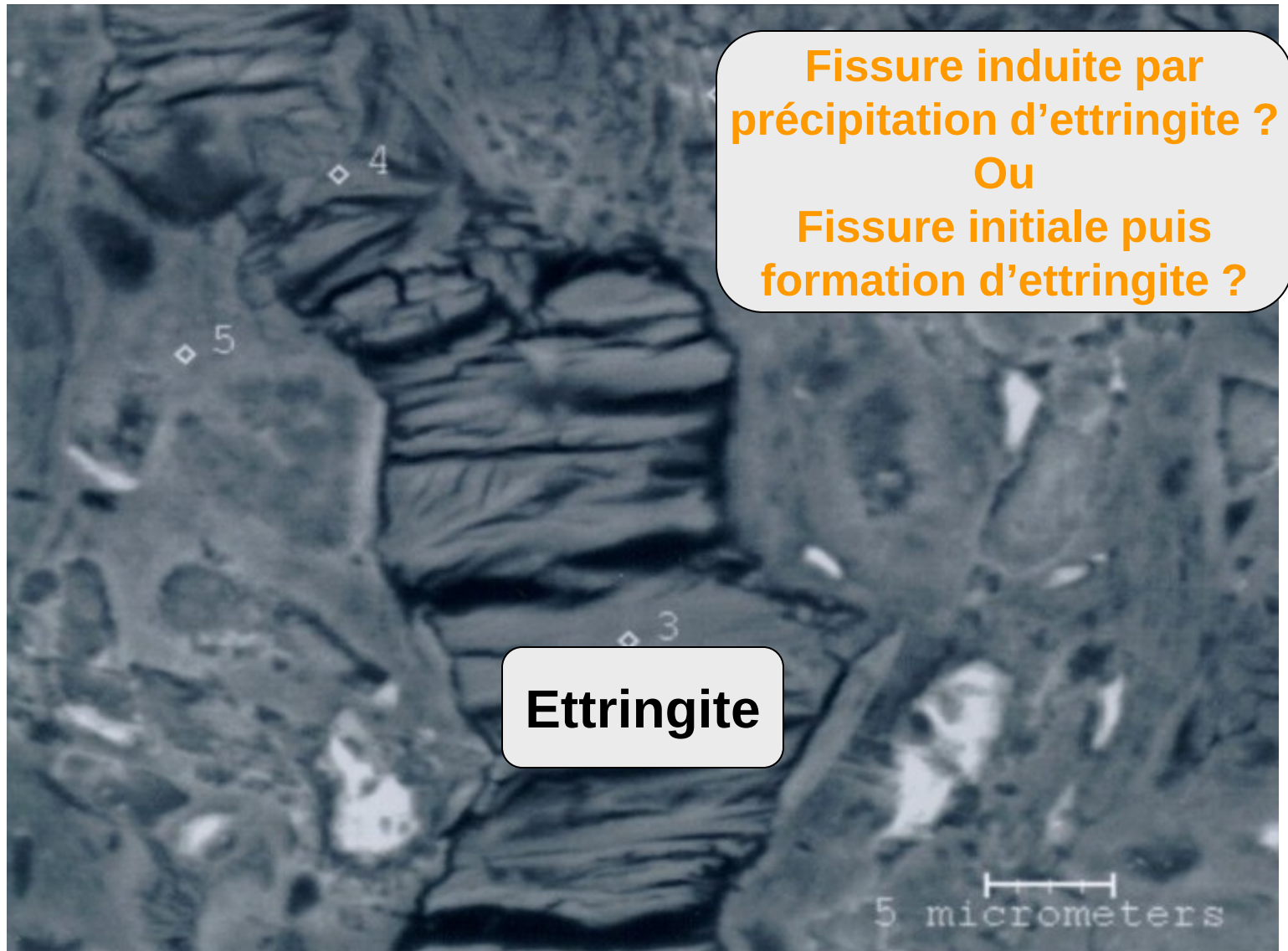
Attaque interne: Formation différée d'ettringite (DEF)

MEB sur section polie

Couche compacte d'ettringite



Attaque interne: Formation différée d'ettringite (DEF)



Attaque interne: Formation différée d'ettringite (DEF)

Gonflement associé à la précipitation massive d'ettringite,
après la prise, sans apport de sulfate d'origine externe
Seul apport extérieur : l'eau

A ne pas confondre avec d'autres pathologies (moins rares) :

- La réaction sulfatique externe (exogène)
→ apport d'ions sulfate par le milieu extérieur
- La réaction alcali-silice (endogène)
→ réaction entre la silice mal cristallisée de certains granulats avec les alcalins du béton

Attaque interne: Formation différée d'ettringite (DEF)

Conditions généralement citées pour l'apparition de la DEF (Delayed Ettringite Formation) :

- Température > 65°C : les bétons dégradés ont été traités thermiquement ou ont subi une élévation de température due à la chaleur d'hydratation du ciment (pièces massives),
- Environnement humide,
- Potentiel de formation d'ettringite en relation avec la composition du ciment : SO_3 et C_3A élevés mais aussi influence des alcalins sur la solubilité de l'ettringite,
- Qualité des sables ou granulats ; les minéraux siliceux favoriseraient la DEF,
- La DEF peut coexister avec d'autres pathologies et en particulier la réaction alcali-granulat.

Attaque interne: Formation différée d'ettringite (DEF)

Mécanisme :

1 -Pendant le durcissement du béton :

Température élevée + teneur élevée en alcalins :

- Augmente solubilité de l'ettringite
- Augmente concentrations en ions sulfate
- Adsorption des ions sulfate sur les feuillets de C-S-H
- + formation d'AFm

2 - Lors du retour à température ambiante (+ apport en eau):

Température plus basse + lessivage des alcalins

- Diminue solubilité de l'ettringite
- Diminue la concentrations en ions sulfate
- Désorption des ions sulfate + dissolution de l'AFm pour nourrir la précipitation de l'ettringite

Attaque interne: Formation différée d'ettringite (DEF)

Principaux paramètres influant sur la DEF

- a. Historique de l'échauffement
température, durée
- b. Caractéristiques du ciment utilisé
Teneurs en alcalins, sulfates, aluminates, finesse...
- c. Formulation du béton
Nature des granulats, rapport E/C
- d. Environnement de conservation
Humidité relative, température, lessivage des alcalins

Action des cycles répétés de gel-dégel sur le béton

Lorsque les conditions en service font que la température d'un béton saturé passe en dessous du point de congélation, l'eau contenue dans les pores capillaires de la pâte durcie gèle progressivement, d'une façon identique à celle des pores d'une roche et donne lieu à une expansion.

Le phénomène d'expansion du béton sous l'effet du gel se produit principalement dans la pâte de ciment hydraté. Les vides les plus importants, dus à un serrage ou compactage incomplet du béton, sont habituellement remplis d'air et ne contribuent donc pas de manière sensible au gonflement du béton.

Mécanisme d'action du gel : pressions de dilatation

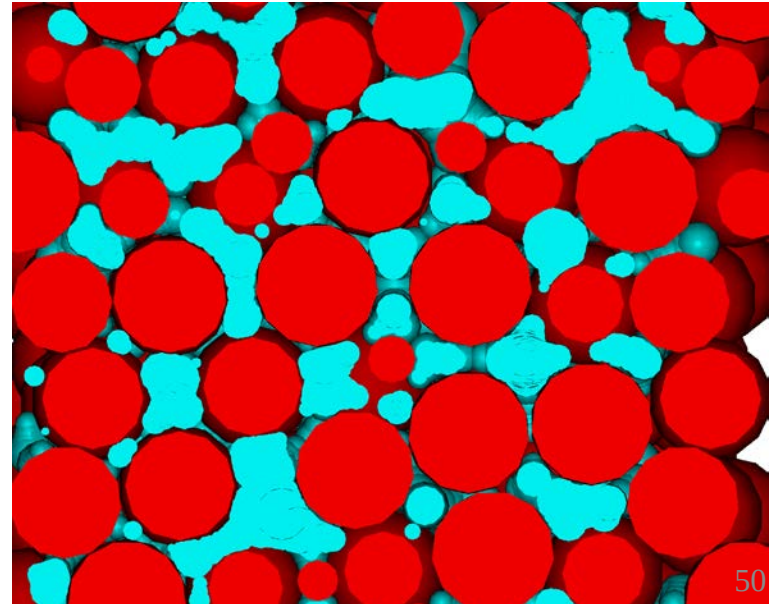
La transformation de l'eau en glace entraîne une augmentation de volume d'environ 9 % et, par conséquent, l'expulsion d'une certaine quantité d'eau du pore où la glace est formée. La vitesse à laquelle peut s'écouler l'eau déplacée par le front de glace est déterminée par :

- la vitesse de formation de la glace,
- la perméabilité de la pâte de ciment durci,
- la distance que doit parcourir l'eau pour arriver à un vide pouvant recevoir cette eau excédentaire.

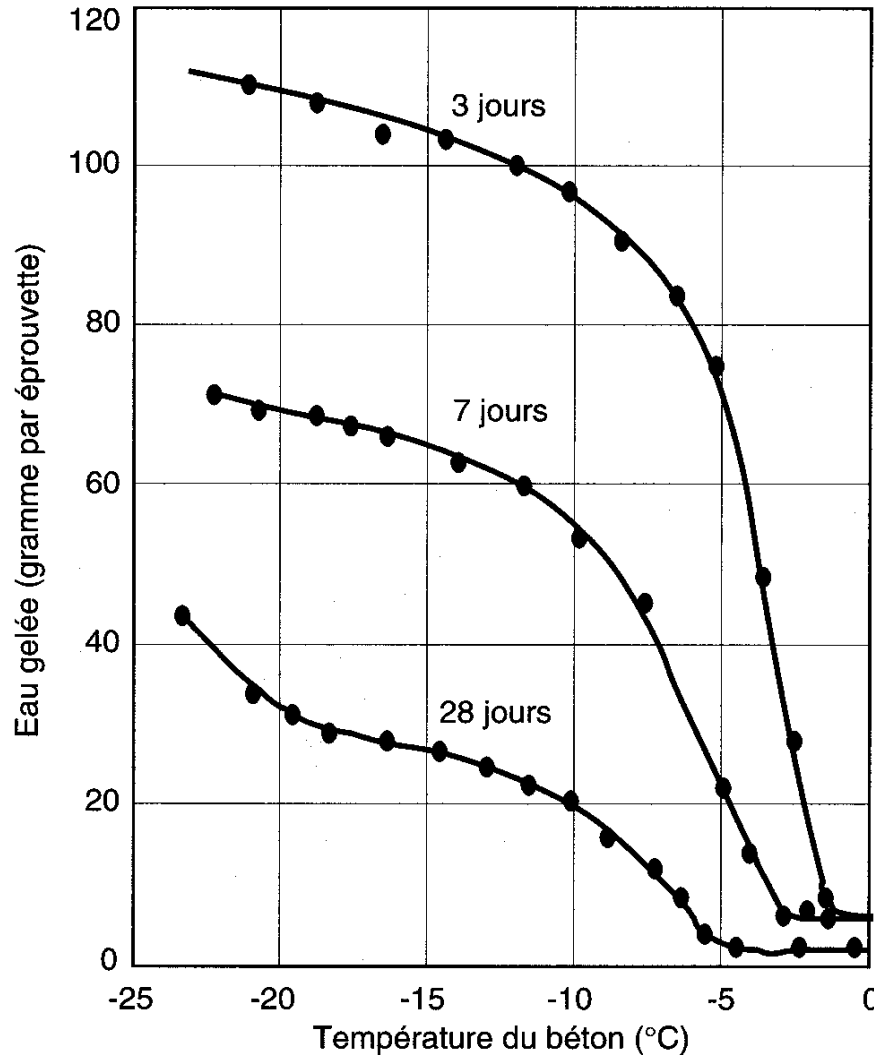
Mécanisme de formation de la glace dans un béton

L'eau contenue dans les pores du béton va geler à des températures inférieures à 0°C, selon

- la composition de la solution interstitielle du béton
- la taille des pores (la température de congélation est d'autant plus basse que la taille des pores est petite)



Paramètres modifiant l'action du gel



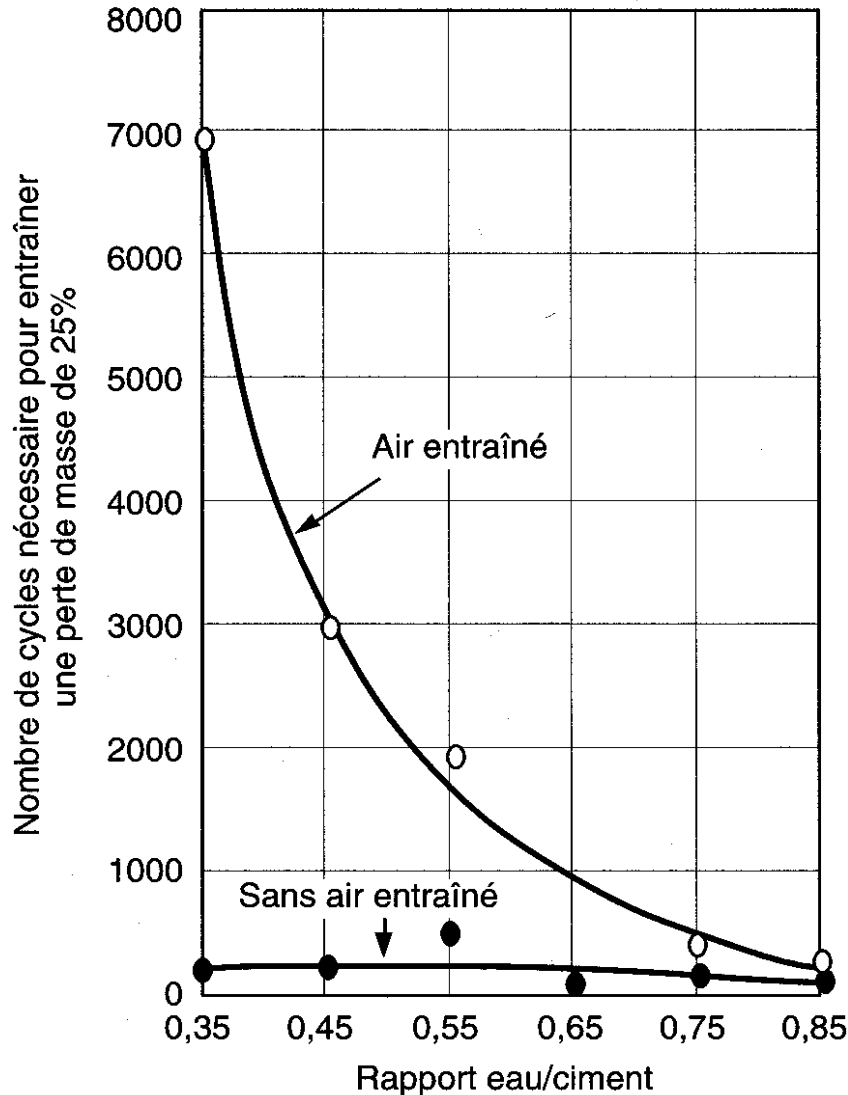
Un faible rapport eau/ciment permet de réduire au minimum le volume total de pores capillaires. **Il est essentiel que l'hydratation du béton soit bien avancée avant qu'il ne soit exposé au gel.** La température à laquelle l'eau des capillaires commence à geler est voisine de - 1 °C à 3 jours, - 3 °C à 7 j et - 5 °C à 28 j.

Mécanisme d'action du gel : pressions de dilatation

Lorsque la contrainte induite par la cristallisation de la glace et l'écoulement de l'eau liquide, excède la résistance à la traction du béton, les désordres apparaissent. La gamme de ces désordres peut aller d'un écaillage de surface à la désintégration complète du béton depuis la surface exposée pour progresser en profondeur au fur et à mesure que la glace se forme

La résistance au gel-dégel du béton dépend surtout du degré de saturation de la pâte de ciment durci et des caractéristiques de son réseau poreux : en deçà d'une valeur critique de saturation, le béton est très résistant au gel et le béton sec n'est nullement affecté.

Paramètres modifiant l'action du gel : entraîneur d'air



Lors de la formation de la glace, l'espace disponible pour recevoir l'eau expulsée hors des capillaires doit être suffisamment proche des cavités dans lesquelles se forme la glace.

Il s'agit du principe de base des **entraîneurs d'air** : si la pâte de ciment durci est divisée par les bulles d'air très proches, elle n'a pas de saturation critique.

Entraîneurs d'air

Les principaux types d'agent entraîneur d'air sont les suivants :

- des sels d'acides gras dérivés de graisses et d'huiles animales et végétales;
- des sels alcalins de résine de bois;
- des sels alcalins de composés organiques sulfatés et sulfonés.

L'air entraîné donne naissance à un **réseau de bulles discrètes** à peu près sphériques dans la pâte de ciment, en sorte qu'aucun canal permettant la circulation de l'eau n'est formé et que la perméabilité du béton ne se trouve pas augmentée.

Résistance du béton au feu

Le béton a un bon comportement sur le plan de la résistance au feu; le béton est non combustible, la durée d'exposition au feu durant laquelle il continue d'offrir de bonnes performances est relativement élevée et il ne dégage pas de fumée toxique.

Les critères correspondants de performance sont :

- la capacité à reprendre les charges,
- la résistance à la pénétration des flammes
- la résistance à la transmission de la chaleur lorsque le béton est utilisé comme matériau protecteur pour l'acier.

Résistance du béton au feu

En considérant le comportement du béton en tant que matériau, on doit noter que **le feu introduit des gradients élevés de température** et, en conséquence, les couches chaudes de surface ont tendance à se séparer du coeur plus froid du béton. La **formation de fissures** est favorisée aux joints, dans les parties du béton peu consolidées ou dans les plans des armatures; une fois les armatures exposées, elles véhiculent la chaleur et accélèrent l'action des températures élevées.

Résistance du béton au feu

Résistance du béton au feu

Mécanisme de déformation

La stabilité thermique du béton repose sur celle de la pâte de ciment hydratée mais aussi sur celle du granulat. A des températures élevées, ces constituants sont susceptibles de se décomposer ou d'être le siège de transformations cristallines qui modifient profondément les caractéristiques du matériau.

L'expansion thermique de chacun des constituants du béton produit une dilatation de l'éprouvette. D'autre part, l'évaporation de l'eau libre qui est présente dans le béton, produit un retrait de celui-ci.

Ainsi la déformation totale d'une éprouvette de béton non chargée soumise au chauffage est due à:

- l'expansion thermique des granulats du béton,
- le retrait de dessiccation de la pâte,
- les transformations chimiques au sein du béton,
- les fissurations,
- la détérioration physique des divers constituants.

Expansion thermique des granulats du béton

Pour les granulats courants, il convient de faire la différence entre deux types de roche:

- les roches calcaires,
- les grès et les quartzites.

Les dilatations thermiques sont plus importantes pour les grès et les quartzites que pour les roches calcaires

Pour les grès et les quartzites, les courbes de dilatométrie présentent une soudaine et significative augmentation d'expansion autour de 570°C due au changement de phase du quartz α en quartz β dans ces granulats.

Evolution de la pâte de ciment avec la température

L'exposition du béton à une température élevée provoque une **dégradation chimique** progressive du béton qui peut être suivie par analyse thermique différentielle (ATD) :

- **Entre 30 et 120°C**, l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. L'eau non liée est complètement éliminée à 120°C.
- **Entre 130 et 170°C**, une double réaction endothermique peut avoir lieu, correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- **Autour de 180°C (jusqu'à 300°C)**, on a la première étape de la déshydratation de C-S-H : l'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.
- **Entre 450 et 550°C**, il y a décomposition de la portlandite en chaux libre: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \Rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

Evolution de la pâte de ciment avec la température

- Autour de 570°C (573°C), il y a transformation de structure du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement.
- Entre 600 et 700°C, il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de (β -C₂S).
- Entre 700 et 900°C, il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en CaCO₃ => CaO + CO₂, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique.
- Au dessus de 1300-1400°C, le béton passe à l'état de boue (début de fusion de certains constituants).

Risque d'éclatement

Le risque d'éclatement explosif est **d'autant plus élevé que la perméabilité du béton est faible (BHP & BTHP)** et que la vitesse d'élévation de la température est élevée.

Dans le même sens, on a observé que la perte de résistance à des températures élevées est plus grande pour des bétons saturés que pour des bétons secs et que la teneur en humidité au moment de l'application de la charge est responsable de cette différence.

L'influence de l'état d'humidité sur la résistance est également évidente dans les essais de résistance au feu du béton, **où une humidité excessive au moment de l'incendie est la cause principale de l'éclatement.**

Mécanisme de l'éclatement

Lorsque la température sur la face exposée à la chaleur augmente et atteint 100 °C, le taux de désorption d'humidité sur la couche de béton en surface augmente, une partie de la vapeur d'eau désorbée se déplace vers la zone de béton froide (l'autre s'évapore à l'extérieur) et se condense plus profondément là où la température est suffisamment basse. Les pores qui sont dans cette direction se remplissent graduellement d'eau libre. Cette eau migre lentement vers les régions froides, spécialement à travers les fissures où la résistance à l'écoulement du liquide est moindre.

Mécanisme de l'éclatement

Si l'une des faces du béton n'est pas exposée à la chaleur, l'eau ou la vapeur peut s'échapper par cette face. Il faudrait donc que cette surface froide soit suffisamment grande pour évacuer le débit d'eau désorbée sinon il y a accumulation de pression dans le béton et risque d'éclatement de la couche de béton la plus exposée à la chaleur.



**Exemple de
BHP ayant
éclaté après
avoir été
soumis à
Chauffage à
600°C**

Essai au feu sur éléments de structures

