une nouvelle université prend vie

Un modèle pionnier et unique en France
Université Gustave Eiffel
1er janvier 2020

FUTURE
INVENTING THE CITY OF TOMORROW

UNIVERSITÉ PARIS-EST

INVESTIR L'AVENIR

École d'architecture
de la ville & des territoires
à Marne-la-Vallée

EIVP

ENSG Géomatique

ESIEE PARIS

IFSTTAR

UPEM
UNIVERSITÉ PARIS-EST MARNE-LA-VALLÉE

une nouvelle université prend vie

L'objectif

Créer une université unique, atypique et pionnière, le premier établissement national à rassembler :

Un organisme de recherche

Une université

Une école d'architecture

Trois écoles d'ingénieurs

École d'architecture de la ville & des territoires à Marne-la-Vallée

EIVP – École des Ingénieurs de la Ville de Paris – École Supérieure du Génie Urbain

ENSG Géomatique

ESIEE Paris

IFSTTAR

UPEM Université Paris-Est Marne-la-Vallée

12 février 2020 - Nouméa

Divet Loïc

Pathologie et durabilité du béton armé

Université Gustave Eiffel

Plan de l'exposé

- ✓ Quelques généralités sur les pathologies du béton armé

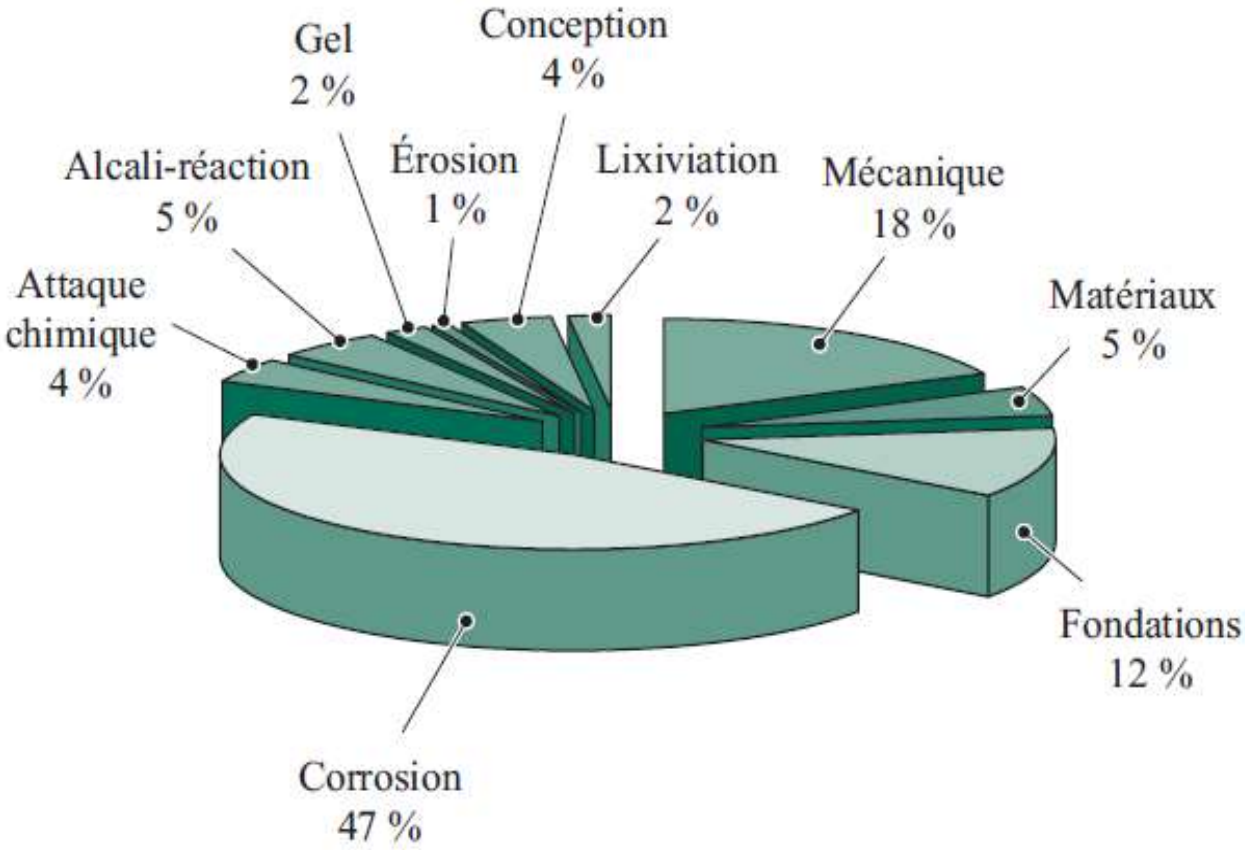
- ✓ De nouvelles pathologies :
  - ✓ L'alcali-réaction
  - ✓ La réaction sulfatique interne
  - ✓ L'oxydation de la pyrite / pyrrhotite

- ✓ Nouvelle approche performatielle de la durabilité

Durabilité des bétons armés ?

Pont de Normandie: une structure conçue pour avoir une bonne durabilité

Les dégradations du béton armé



Source : données REHABCON [Naar, 2006]

Enquêtes menées à l'échelle européenne auprès d'administrations et de gestionnaires (ponts et bâtiments)

Un béton armé durable est lié à son histoire

- ✓ **La formulation du béton**
  - ✓ Le choix des constituants
  - ✓ La détermination des dosages
- ✓ **La fabrication**
  - ✓ Le malaxage des constituants
  - ✓ Le transport (t, T, HR)
  - ✓ La mise en place
  - ✓ La vibration
  - ✓ La cure
- ✓ **L'évolution dans le temps**
  - ✓ La durabilité / environnement

La qualité d'un béton dépend du soin apporté à chacune de ces étapes

Les critères de durabilité du béton armé

➔ **dépend de 3 facteurs :**

✓ **La composition chimique et minéralogique du liant**

- ✓ détermine la basicité du système (+ ou - grande sensibilité à l'environnement)

✓ **La microstructure (la compacité)**

- ✓ dont dépendent les propriétés de transfert (diffusivité et perméabilité)

Diffusivité = transport à l'échelle moléculaire sous gradient de concentration - loi de Fick

Perméabilité = transport par écoulement hydraulique qui se produit sous gradient de pression - loi de Darcy

✓ **L'environnement (NF EN 206/CN et NF P 18-011) et particulièrement l'humidité relative du milieu**

- ✓ L'eau étant le vecteur des agents agressifs

La pathologie du béton armé

Le béton n'est pas un matériau inerte :

✓ **Il travaille et subit l'épreuve du temps dans le milieu plus ou moins agressif qui l'entoure**

✓ **Causes : 3 types de désordres**

- ✓ **sollicitations mécaniques**
  (fatigue due aux sollicitations répétées)
- ✓ **les altérations physiques**
  (abrasion, chocs thermiques, action du gel)
- ✓ **les altérations chimiques**

✓ **Conséquence :** il faut déterminer son état de santé actuel lié à l'espérance de vie d'un ouvrage

Classes d'exposition en fonction de l'environnement

La norme NF EN 206/CN
Béton - Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité

6 grandes classes définies

- ✓ **X0 :** Aucun risque de corrosion ni d'attaque
- ✓ **XC1 à XC4 :** Corrosion par carbonatation
- ✓ **XD1 à XD3 :** Corrosion par les chlorures (autres qu'eau de mer)
- ✓ **XS1 à XS3 :** Corrosion par les chlorures (eau de mer)
- ✓ **XF1 à XF4 :** Attaque gel/dégel
- ✓ **XA1 à XA3 :** Attaques chimiques

Corrosion des aciers

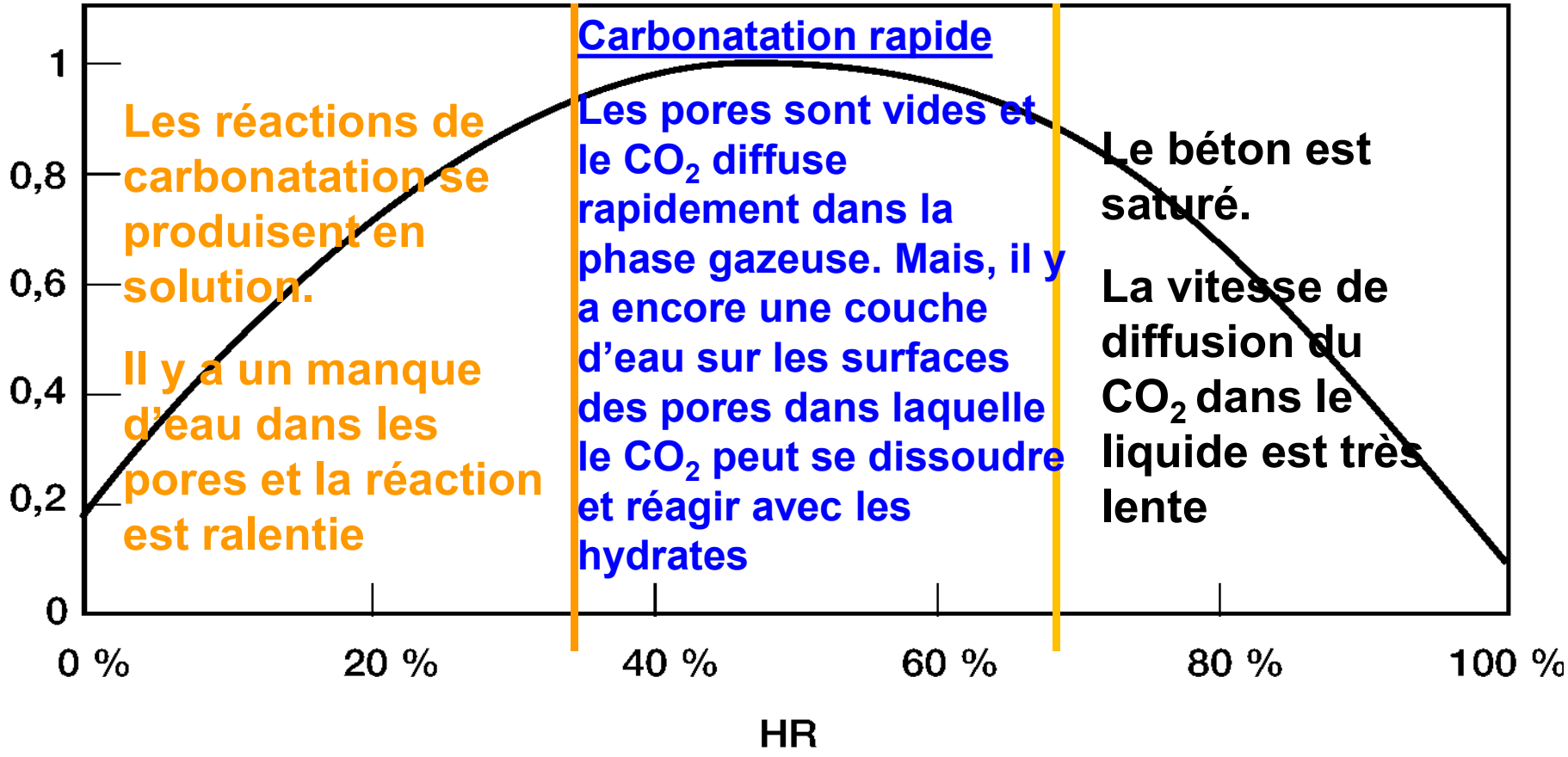
Action des chlorures

Apportés par l'eau de mer

La carbonatation

Eléments les plus sensibles des bâtiments, du fait soit de leur minceur, soit de la difficulté à maintenir des enrobages suffisants

Carbonatation : Influence de l'humidité relative

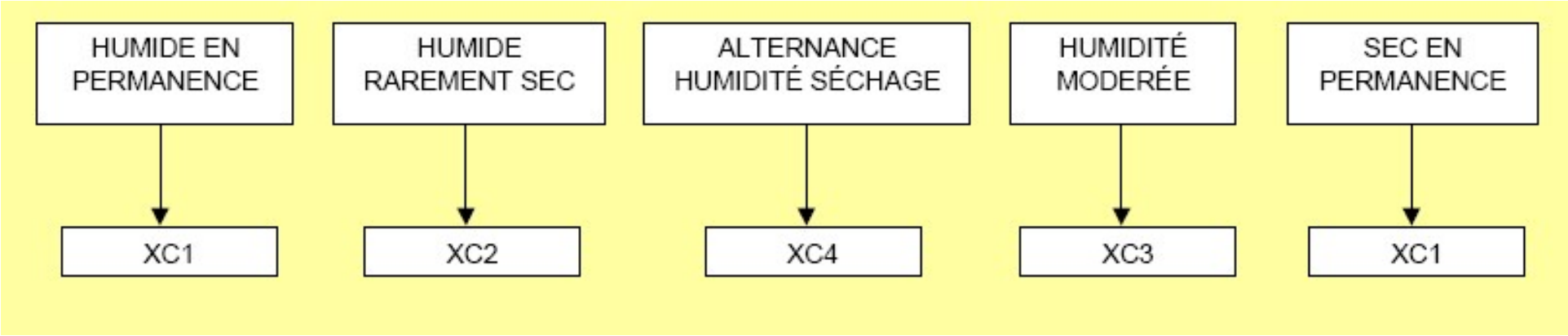


Facteur f(HR) exprimant l'influence de l'humidité relative (HR) sur la cinétique de carbonatation d'un béton

Classes d'exposition – NF EN 206/CN

Corrosion induite par la carbonatation

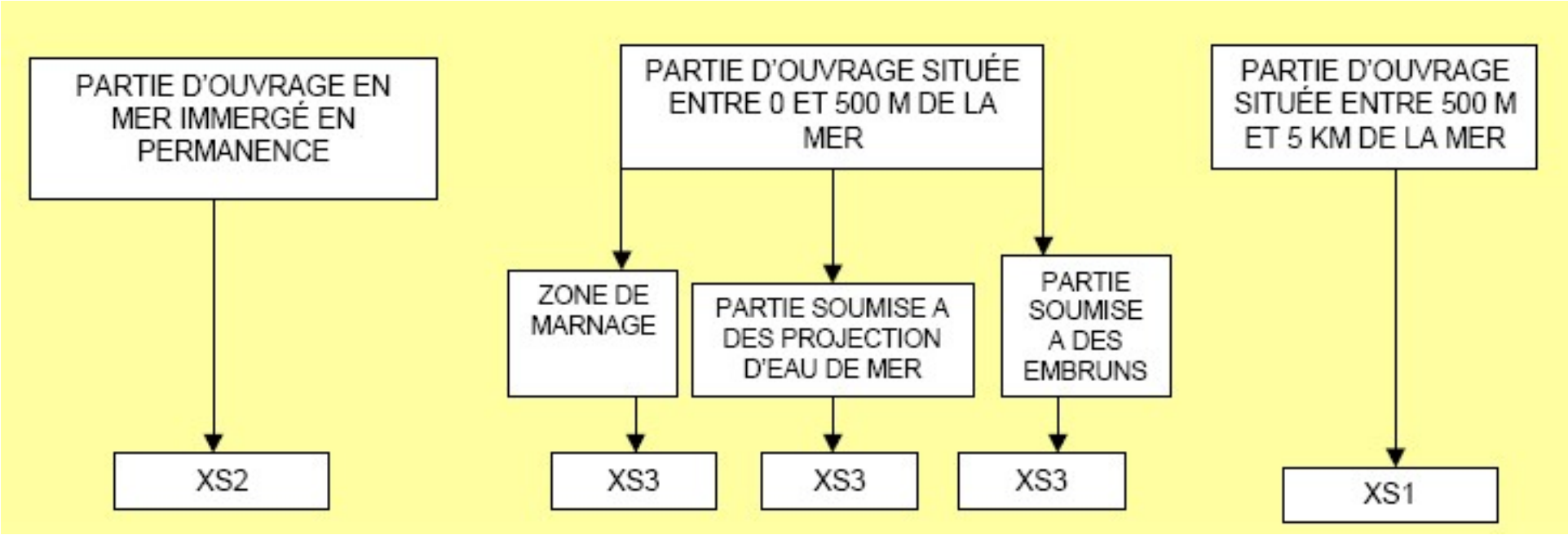
Les classes XC1 à XC4 prennent en compte l'exposition du béton à l'air et à l'humidité en distinguant le degré d'humidité de l'environnement et l'alternance d'humidité et de séchage



Classes d'exposition – NF EN 206/CN

Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer

Cette classe concerne les bétons soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant des sels marins



Conclusions – Corrosion des aciers

✓ L**es dommages** résultent toujours d'une **épaisseur d'enrobage trop mince et/ou d'un béton poreux**

✓ **La carbonatation du béton est un phénomène inéluctable**, peu nuisible pour le béton, mais très dommageable pour les aciers

✓ on limite les effets de la carbonatation du béton et de la pénétration des chlorures par :

- un **enrobage compact**

- une **épaisseur d'enrobage plus élevée**

- **l'utilisation d'un ciment adapté** (les additions minérales tels que les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes, les fumées de silice limitent en général la diffusion des chlorures)

✓ **respecter les règles, les recommandations et les normes**

De nouvelles pathologies sont apparues

- ✓ **La réaction alcali-silice (RAG)**
  - ✓ En France : **1980**

- ✓ **La réaction sulfatique interne (RSI)**
  - ✓ En France : **1996**

- ✓ **L'oxydation de la pyrrhotite dans les granulats**
  - ✓ Au Canada : **2000**

- ✓ **La laumontite dans les granulats**
  - ✓ Au Japon et en Nouvelle Calédonie :

La réaction alcali-silice (1980 en France)

La réaction alcali-silice

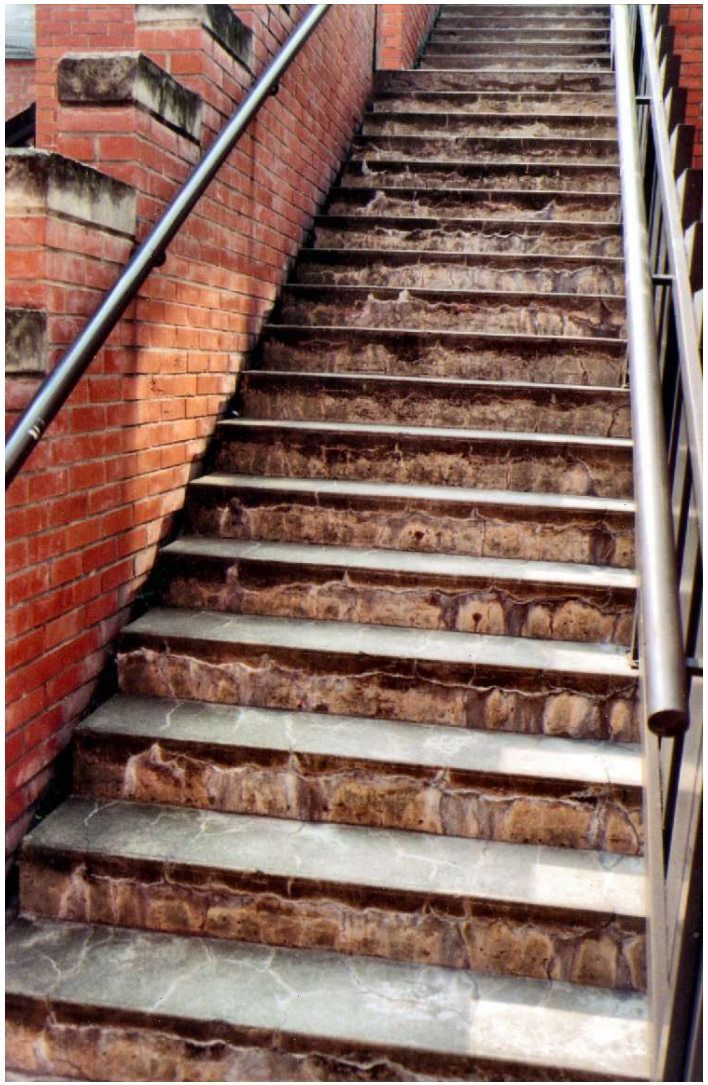
Description des désordres (ouvrages d'art) :

Le faciès le plus fréquent est la fissuration en réseau

La réaction alcali-silice

Description des désordres (ouvrages d'art) :

Le faciès le plus fréquent est la fissuration en réseau



Le mécanisme de la réaction alcali-silice

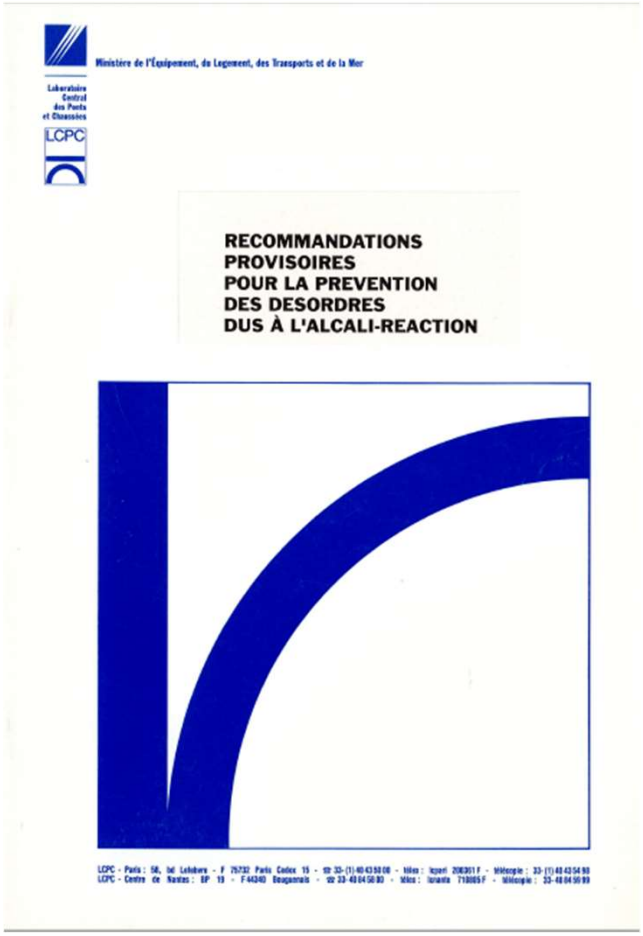
3 conditions indispensables pour le développement de l'alcali-réaction

✓ La présence d'un **granulat potentiellement réactif** (silice réactive)

✓ Une **concentration en alcalins** (Na^+ et $K^+ \Rightarrow OH^-$) élevée dans la solution interstitielle du béton

✓ Des conditions d'**humidité** suffisamment élevées ou présence d'eau

Méthode de prévention de la réaction alcali-silice



Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de la Mer

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LCPC

RECOMMANDATIONS PROVISOIRES POUR LA PREVENTION DES DESORDRES DUS À L'ALCALI-REACTION

Janvier 1991

FD P18-542 (novembre 2017)

FD P 18-542
novembre 2017
Indice de classement : P 18-542
ICS : 91.100.15

Granulats — Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction

E : E : Agregates — Criteria for qualification natural agregates for hydraulic concrete with respect to the alkali-reaction

D : D : Gesteinskörnungen — Natürliche Gesteinskörnungen für hydraülischen Beton: Eignungskriterien der Alkalireaktion gegenüber

***Fascicule de documentation* publié par AFNOR.**

Remplace le fascicule de documentation FD P 18-542, de juin 2015.

Correspondance

À la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux de normalisation internationaux ou européens traitant du même sujet.

Résumé

Le présent document donne les moyens qui permettent de classer un granulat donné vis-à-vis de l'alcali-réaction. Il définit comment doivent être conduites les opérations de qualification d'un échantillon de granulat ou de roche vis-à-vis de l'alcali-réaction, en s'appuyant sur des analyses et des méthodes d'essais normalisées. Il donne, pour chacun des essais, les critères d'interprétation.

Novembre 2017

La démarche préventive

Fascicule de documentation : FD P 18-464 (avril 2017)

Béton – Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction

Bases de la méthode

1. **Choisir le niveau de risque accepté**
2. **Caractériser l'environnement**

<u>implique le type de précaution à prendre</u>

Caractérisation de l'ouvrage

✓ **3 catégories** représentatives du niveau de risque vis-à-vis de l'alcali-réaction que l'on est prêt à accepter pour un ouvrage donné

➔ **choix décidé par le maître d'ouvrage**

- ✓ **Catégorie I :** ouvrages provisoires, éléments aisément remplaçables, …
- ✓ **Catégorie II :** la plupart des bâtiments et des ouvrages du génie civil
- ✓ **Catégorie III :** les ouvrages exceptionnels (barrages, centrales nucléaires, …)

Détermination du niveau de prévention

Classe d'environnement / Catégorie d'ouvrage	1 Sec ou peu humide	2 Humide Eau	3 Humide avec gel et fondants	4 Milieu marin
I Risque faible ou acceptable	A	A	A	A
II Risque peu tolérable	A	B	B	B
III Risque inacceptable	C	C	C	C

La réaction sulfatique interne (1996 en France)

La réaction sulfatique interne (RSI)

Description des désordres :

Le faciès le plus fréquent est la fissuration en réseau

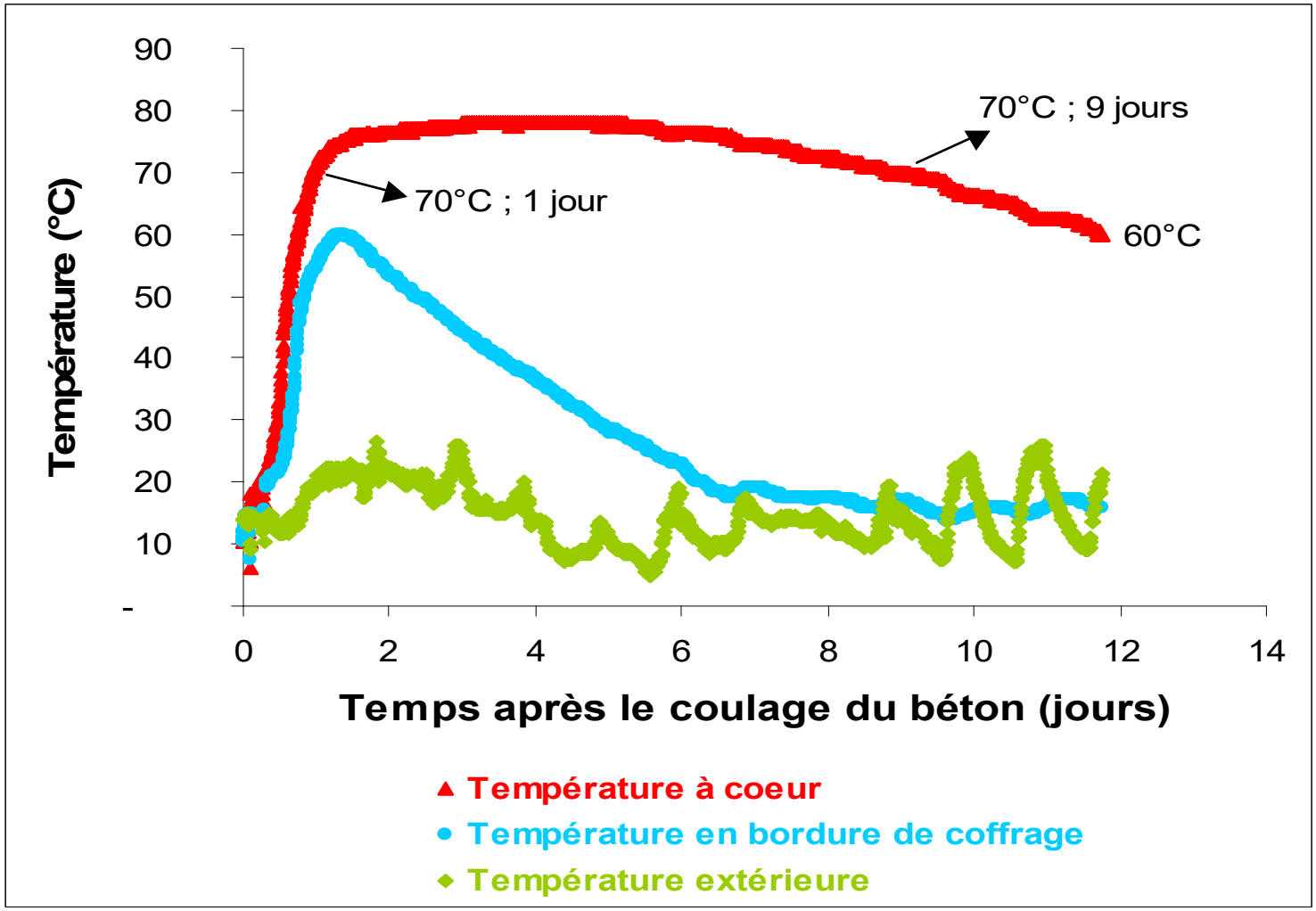
La réaction sulfatique interne

La réaction sulfatique interne

- ✓ **Les sulfates**
  - ✓ un **risque majeur** d'agression chimique pour le béton
  - ✓ un phénomène d'expansion en relation avec la formation d'**ettringite**
- ✓ **Les sources en sulfates peuvent être d'origine :**
  - ✓ **externe** (sol, liquide, gaz)
  - ✓ dégradation progressive depuis la surface vers le cœur de la pièce en béton
  - ✓ **interne** : **RSI** (formation différée de l'ettringite)
  - ✓ remobilisation des sulfates du ciment
  - ✓ dégradation généralisée de la pièce en béton
- ✓ **La principale cause (indispensable mais non suffisante)**
  - ✓ une élévation de la température pendant la prise du béton **T > 65°C**
  - ✓ 2 types de béton concernés : - bétons étuvés
    - bétons de pièces massives (ou critiques)

L'échauffement de béton de grande masse

✓ **Exemple d'enregistrements des températures du béton d'une pièce massive (4x5x6 m)**



Historique

- ✓ **1987 – 1er cas identifié en préfabrication**

  Traverses de chemin de fer

  Finlande, Tepponen et Eriksson

- ✓ **1996 – 1er cas dans les bétons coulés en place**

  Fondation de pylônes de lignes électriques

  Etats Unis, Hime

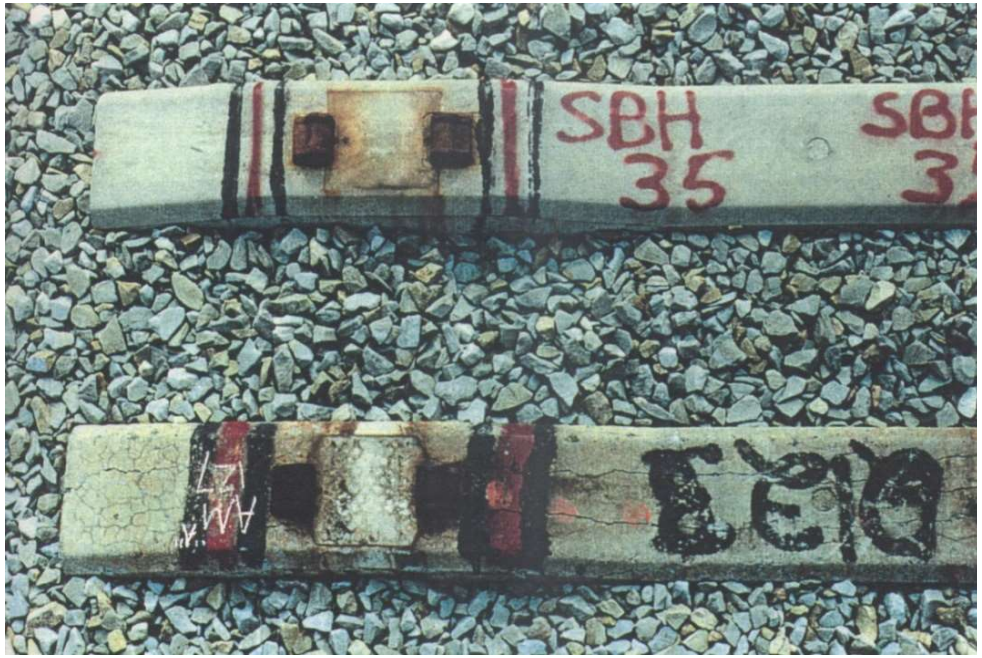
- ✓ **1997 – 1er cas en France**

  Chevêtre sur pile

  Pont d'ondes, Divet et al.

Les traverses de chemin de fer

- ✓ **Finlande** - *Tepponen & Erikson, 1987*
- ✓ **Allemagne** - *Heinz et al., 1989*
- ✓ **Tchécoslovaquie** - *Vitousova, 1991*
- ✓ **Australie** - *Shayan & Quick, 1992*
- ✓ **Afrique du Sud** - *Oberholster et al., 1992*
- ✓ **USA** - *Mielenz et al., 1995*
- ✓ **Suède** – *2004*
- ✓ **Portugal** - *2004*



➔ parfois RSI associée à d'autres dégradations (alcali-réaction, gel/dégel)

Structures concernées en France par la RSI

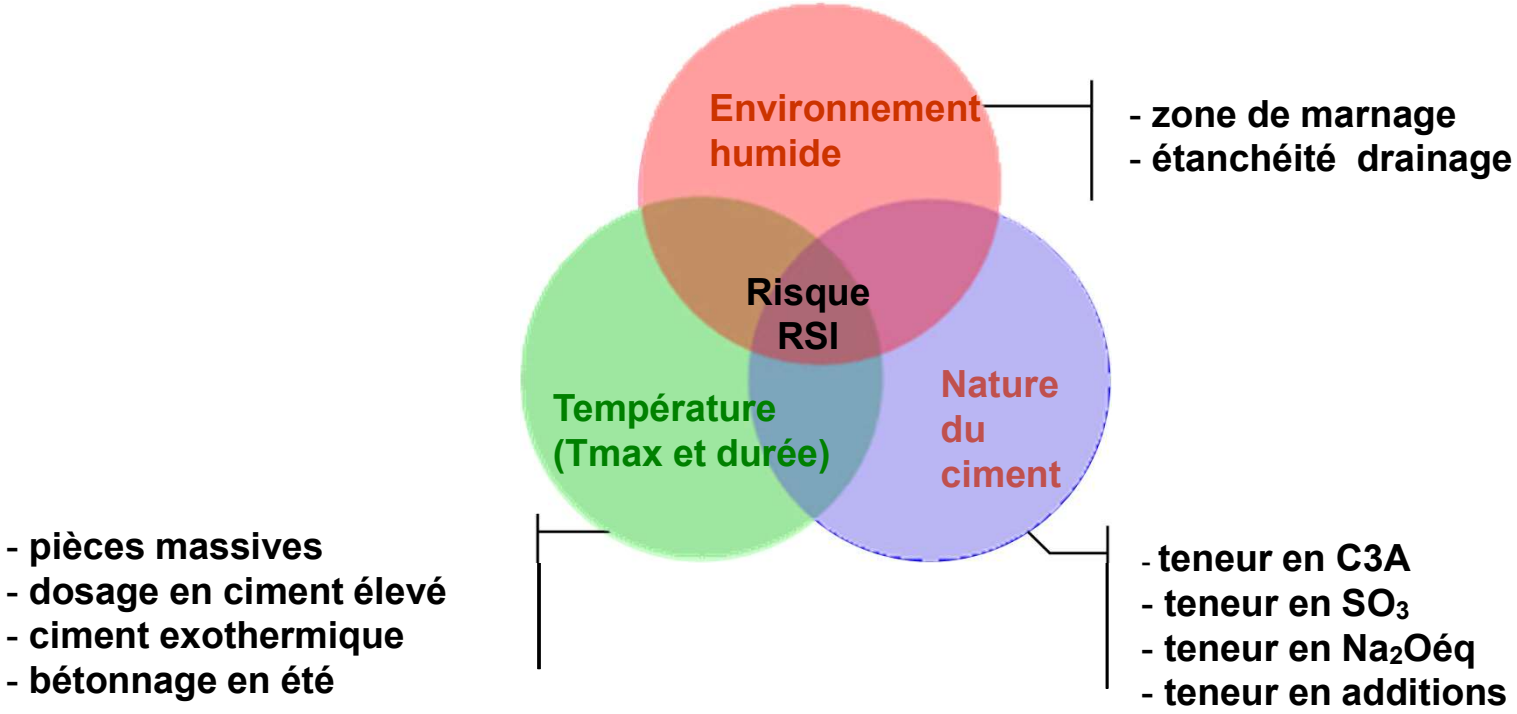
- **Ouvrage du génie civil (béton coulé en place et préfabrication)**
- **Jamais la totalité de l'ouvrage**
- **Pièces massives (ou critiques) pour les bétons coulés en place**
  - Fondations
  - Piles
  - Chevêtres sur piles ou culées
  - Socles de piles
- **Manifestation des désordres :** 5 à 15 ans après la construction
- **Symptômes visuels des désordres**
  - Réseau de fissures multidirectionnelles à large maille
  - Parfois orientation préférentielle en fonction de la distribution des armatures
  - Ouverture des fissures : de 0,1 à 5 mm

Types d’environnement

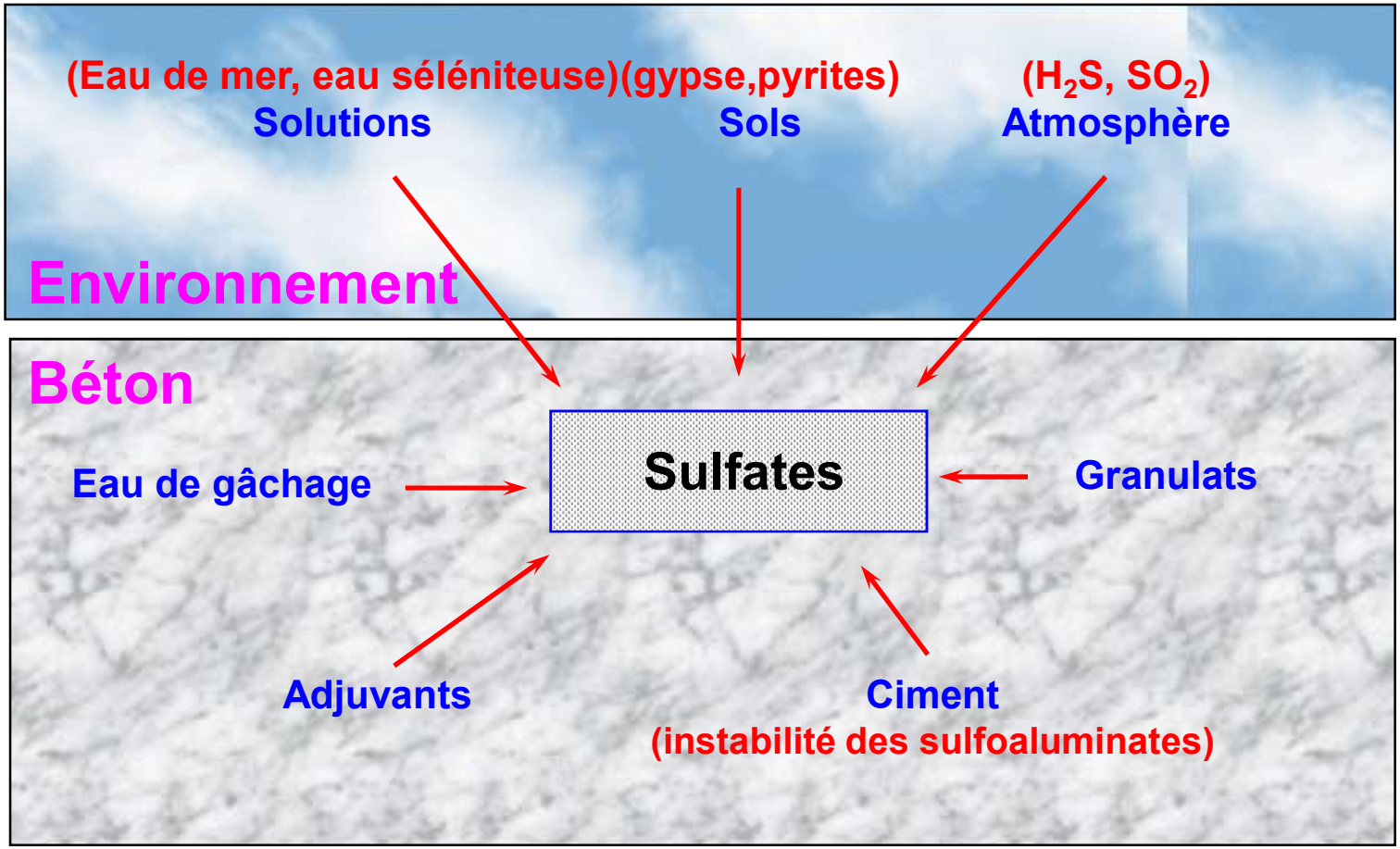
- **Parties d’ouvrage en contact avec l’eau**
  - zone immergée
  - zone de marnage
- **Parties d’ouvrage soumises à des venues d’eau**
  - défaut d’étanchéité
  - défaut de drainage
- **Parties d’ouvrage soumises à l’humidité**
  - phénomène de condensation
  - exposition aux intempéries
  - remontées capillaires

Bilan au niveau des ouvrages

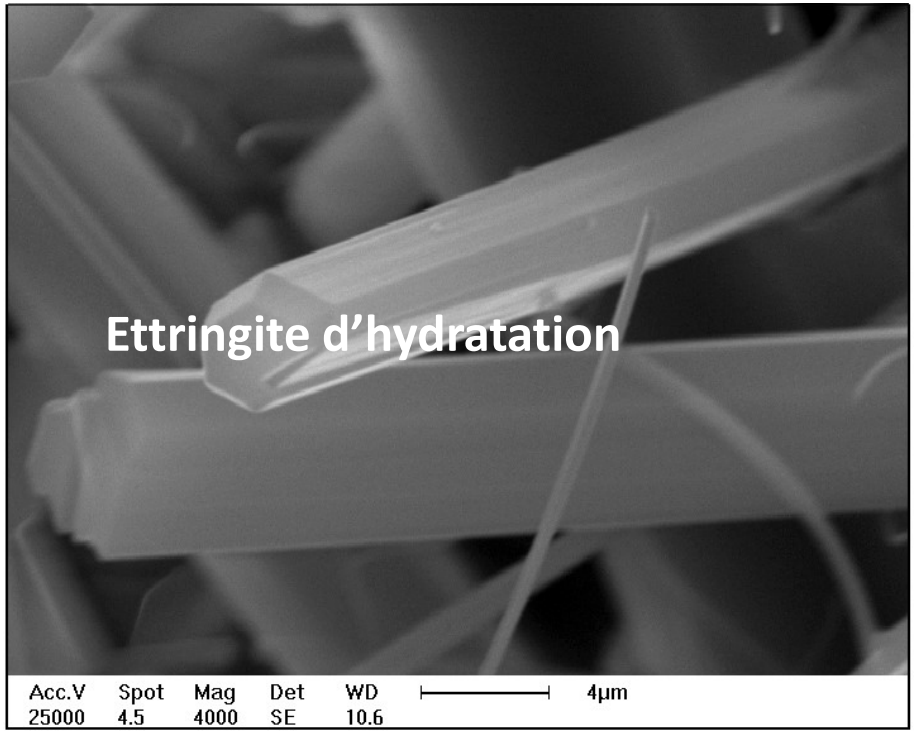
- **Symptômes visuels similaires à l'alcali-réaction**
- **2007 : 30** ouvrages atteints de RSI en France (source LCPC)
- **2012 : 120** ouvrages (source Ifsttar)
- **2019 : ? >> 150** (bétons coulés en place et éléments préfabriqués)

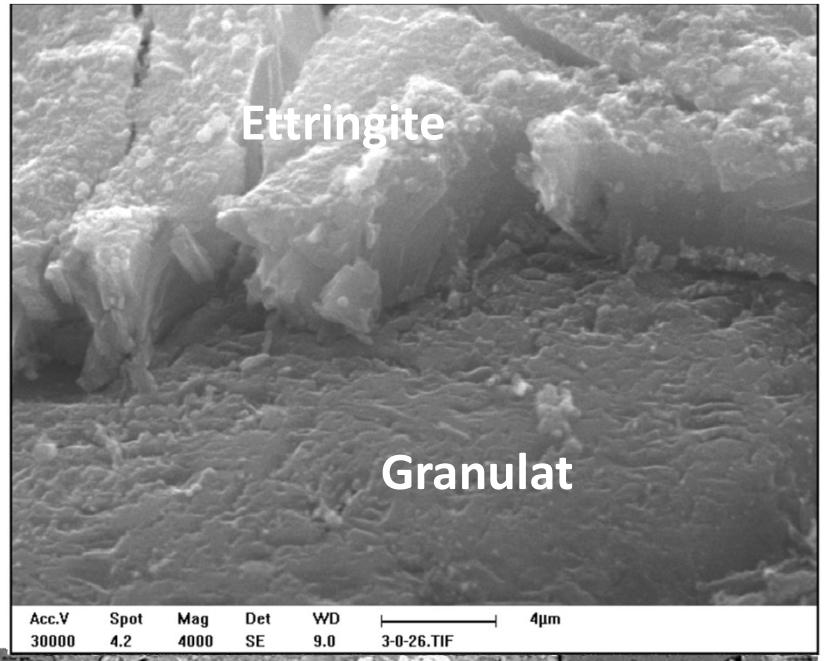


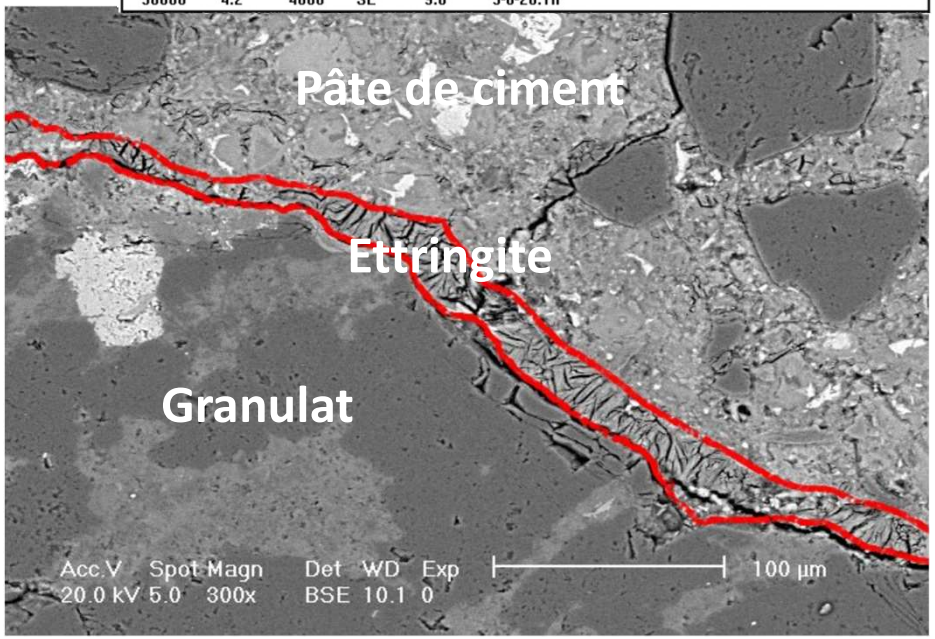
Les différentes sources de sulfate



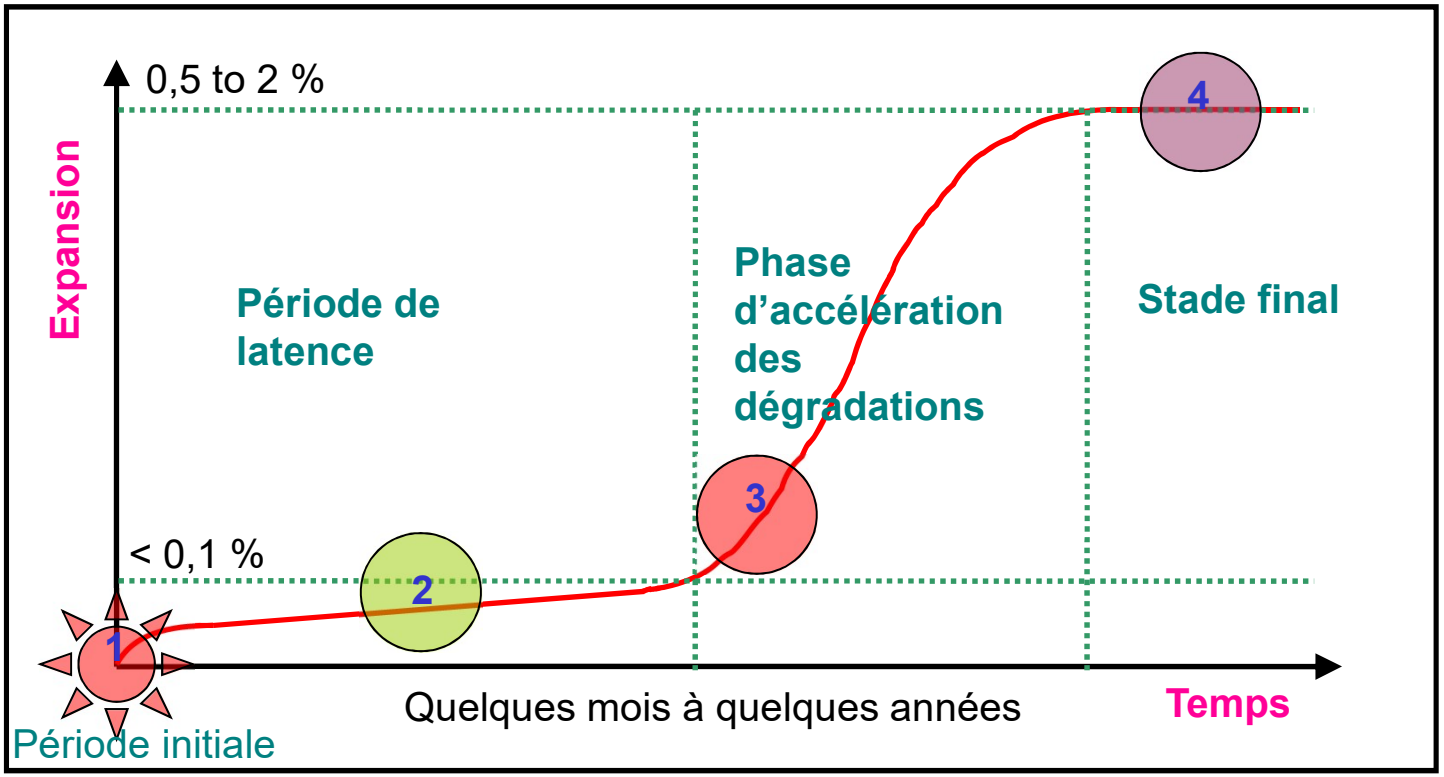
Les produits de réaction







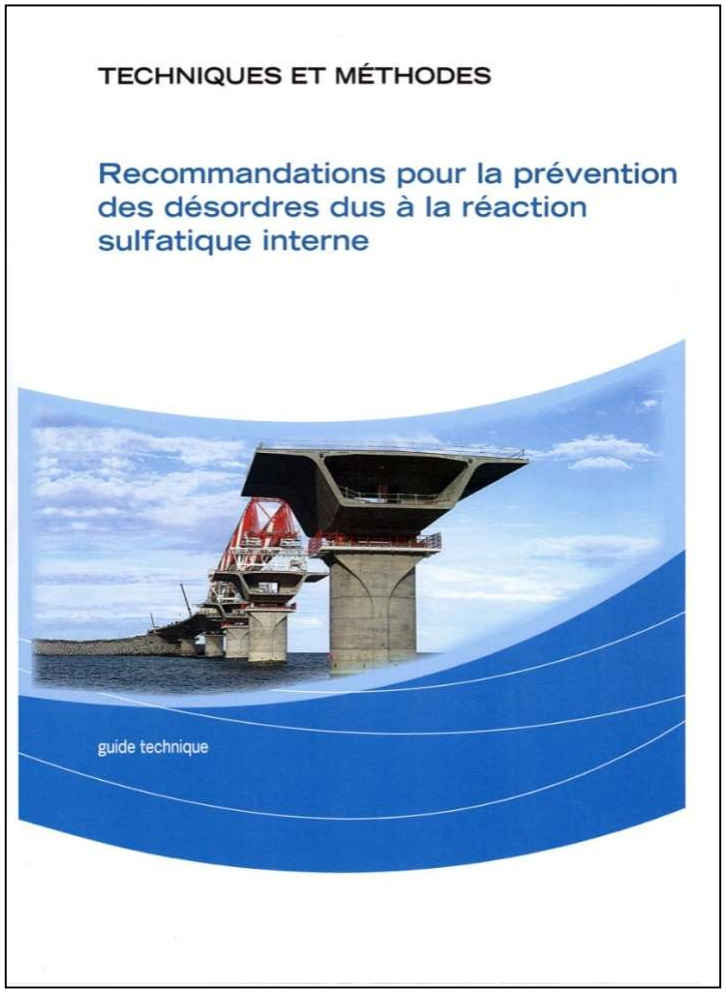
Le mécanisme d'expansion



Mécanisme d'expansion proposé par
(*Brunetaud, 2005*)

Méthode de prévention de la réaction sulfatique interne

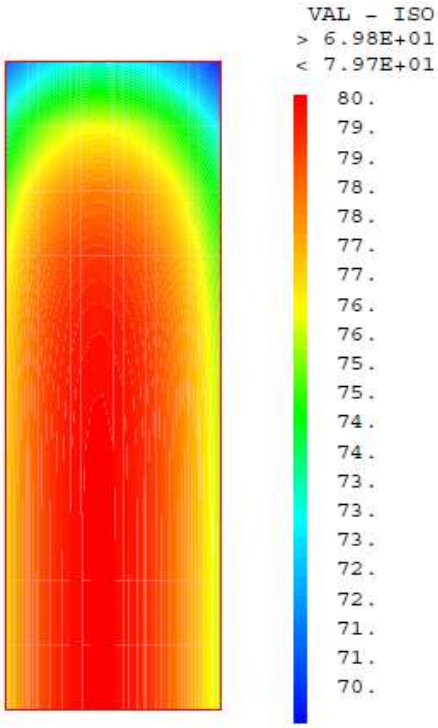
2007



2017

Les recommandations reposent :

- **Principalement sur la température**, avec des relaxations
- Selon le choix du ciment ou des additions minérales
- La réalisation d'un essai de performance



Choix du niveau de prévention

➔ de la responsabilité du maître d'ouvrage

Classe d'exposition / Catégorie d'ouvrage	XH1	XH2	XH3
I Risque faible ou acceptable	As	As	As
II Risque peu tolérable	As	Bs	Cs
III Risque inacceptable	As	Cs	Ds

Principe de prévention

- ✓ **Le principe de prévention repose essentiellement**
  - ✓ sur la **limitation de l'échauffement du béton** caractérisé par **Tmax** susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage

- ✓ **Les recommandations donnent des outils de calcul de l'échauffement du béton**
  - ✓ **méthode simplifiée** permettant d'estimer si les pièces sont considérées comme critiques ➔ **outil d'alerte**

  - ✓ **étude plus fine** en utilisant un **code de calcul aux éléments finis** qui prend en compte la chaleur dégagée par le béton lors d'un essai spécifique

Principe de prévention

Niveau de prévention	Précaution prioritaire	Précaution 2
As	Tmax < 85°C	Tmax < 90°C Et durée (>85°C) < 4 heures
Bs	Tmax < 75°C	Tmax < 85°C et respecter une des 5 conditions
Cs	Tmax < 70°C	Tmax < 80°C et respecter une des 5 conditions
Ds	Tmax < 65 °C	Tmax < 85°C et respecter une des 3 conditions

L’oxydation de la pyrite / pyrrhotite (2000 au Canada)

L’oxydation de la pyrite / pyrrhotite

Description des désordres :

Le faciès le plus fréquent est la fissuration en réseau

L’oxydation de la pyrite / pyrrhotite

L’oxydation de la pyrite / pyrrhotite

Description des désordres :

Parfois, formation de petits cratères avec de la rouille

Mécanisme d'altération

➔ **Une chaîne de réactions**

2 étapes :

- **Etape 1 : l'oxydation de la pyrrhotite**
- **Etape 2 : la réaction sulfatique (gypse, ettringite, thaumasite)**

Oxydation de la pyrrhotite – Etape 1

$$Fe_{(1-x)}S + 15/4\ O_2 + 5/2\ H_2O \rightarrow FeOOH + 2\ H_2SO_4$$

➔ Formation de goethite (rouille)

➔ **Conséquence** : augmentation du volume générant de la fissuration

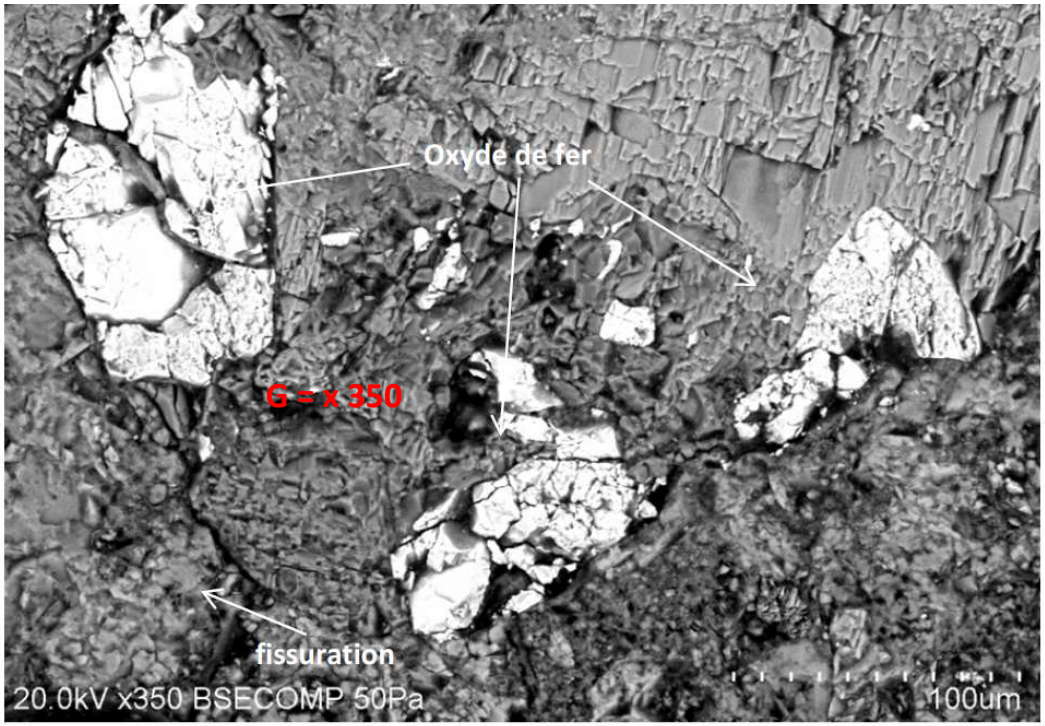
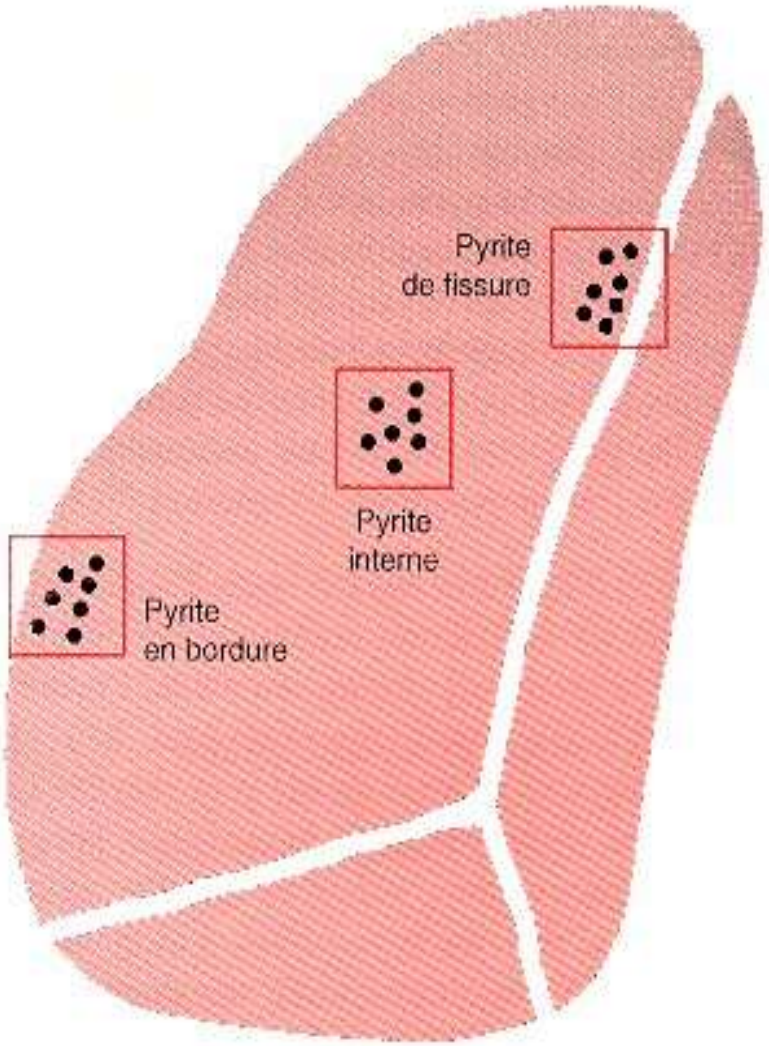


Figure 3 : Oxyde de fer fissuré et contribuant à la fissuration de la pâte.

Premier gonflement du matériau

Oxyde de fer fissuré et contribuant à la fissuration de la pâte de ciment

Oxydation de la pyrite / pyrrhotite

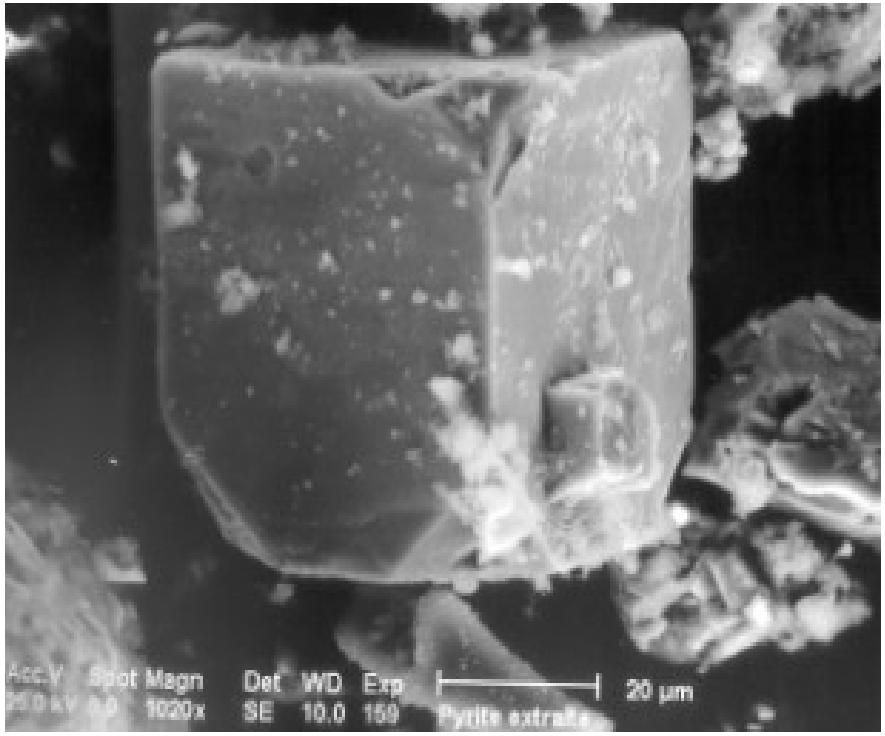


- **La pyrrhotite située en bordure des granulats suite au concassage :**
  Exposée à l'oxydation

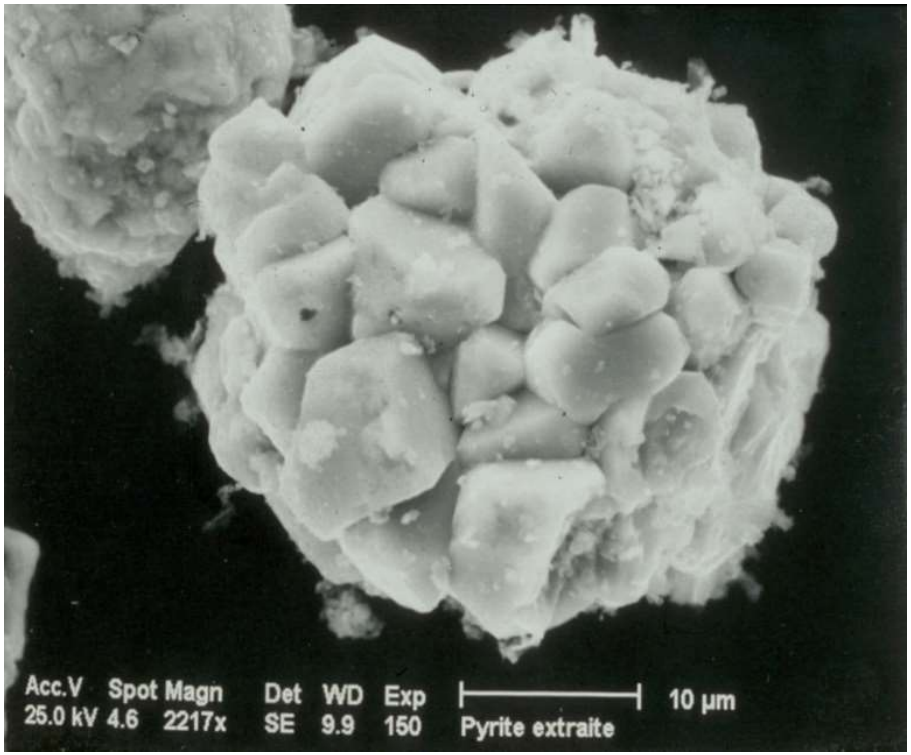
- **La pyrrhotite interne mais traversée par les fissures naissantes :**
  Exposée à l'oxydation

- **La pyrrhotite internes non altérée :**
  Pas encore exposée à l'oxydation

Différentes formes de pyrite

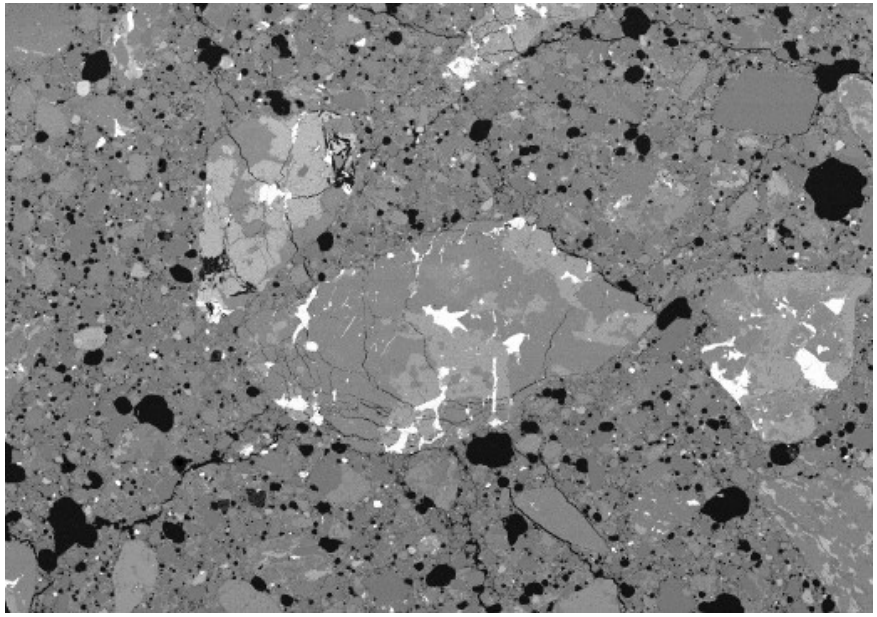


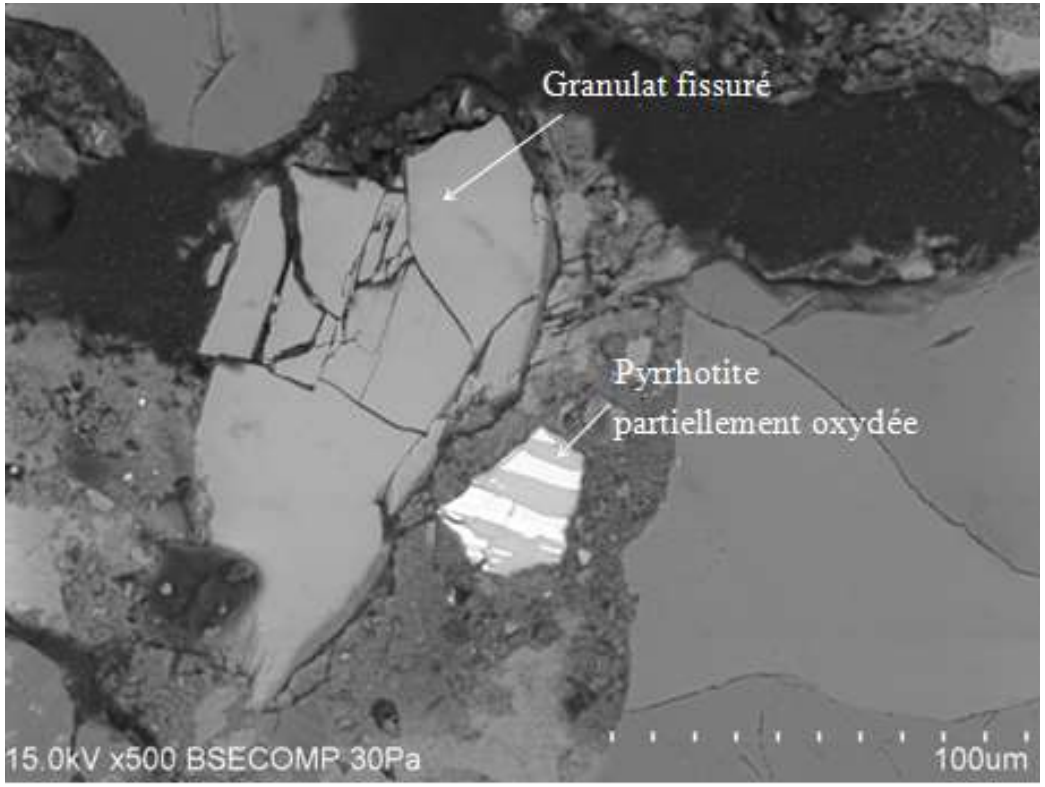
Pyrite cubique



Pyrite framboïdale

Oxydation de la pyrite / pyrrhotite



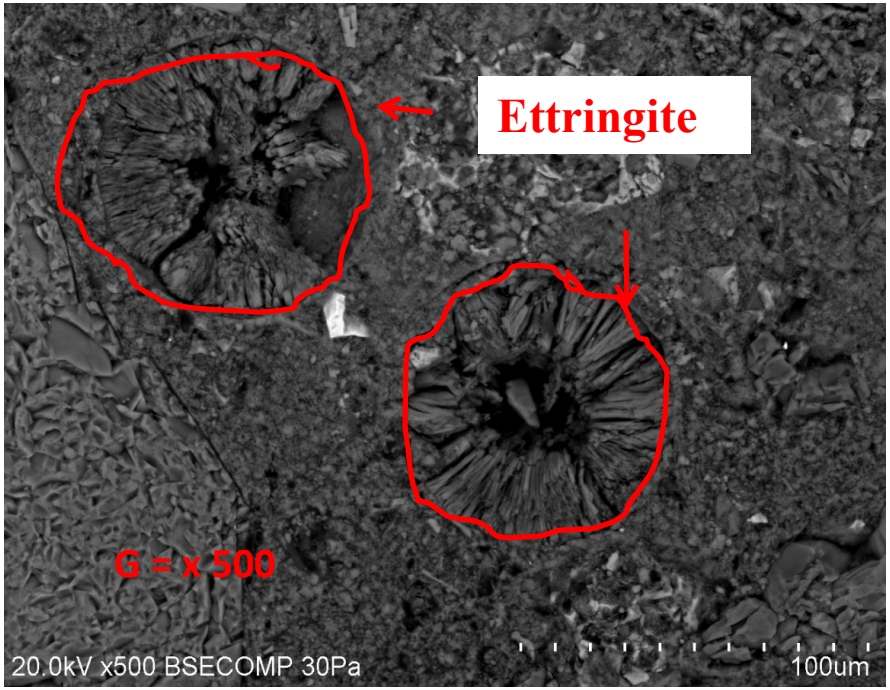


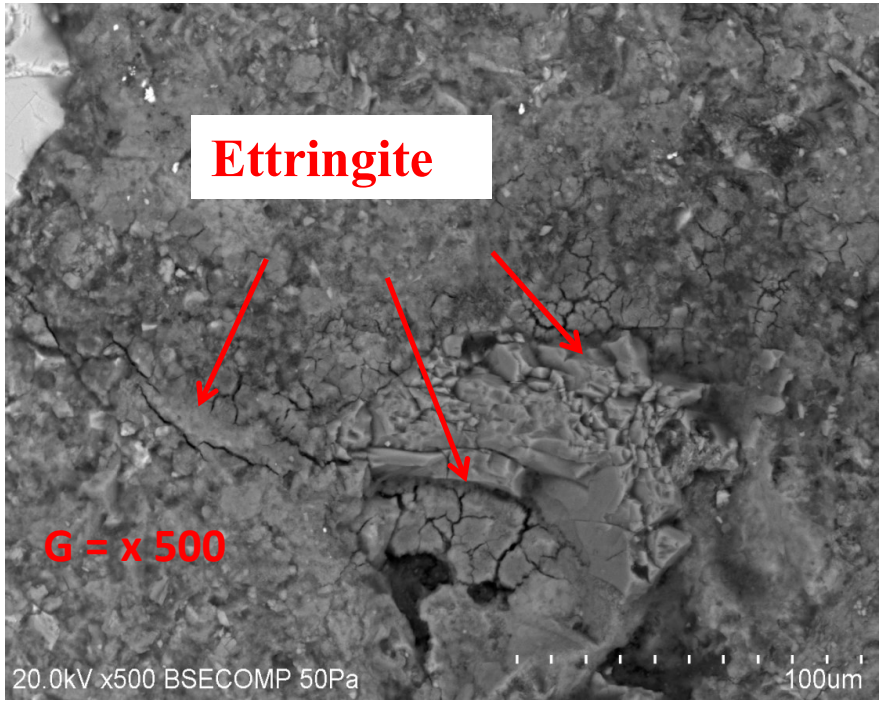
Oxydation de la pyrrhotite – Etape 2

$$CaO.Al_2O_3 + 3\ CaSO_4.2H_2O + H_2O \rightarrow 3\ CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$$

➔ Précipitation d'ettringite ayant des propriétés expansives

➔ **Conséquence : un deuxième gonflement du béton**





Réaction sulfatique interne

Evolution de la norme granulats en France et en Europe

➔ **Seuils exprimés en % massique**

- **Norme française NF P 18 301 (1983)**

Granulats – Granulats pour béton

Teneur en soufre total (sulfates et sulfures) < 0,4% en SO_3 (0,16% en S)

- **Norme française NF P 18 541 (1994)**

Granulats – Granulats pour béton hydraulique

Teneur en soufre total (sulfates et sulfures) < 1% en SO_3 (0,4% en S)

Teneur en sulfates solubles dans l'acide < 0,15 % en SO_3

- **Norme européenne EN 12 620 (2003)**

Granulats pour béton

Teneur en soufre total (sulfates et sulfures) < 1% en S

si pyrrhotite < 0,1% en S

Teneur en sulfates solubles dans l'acide < 0,2% en SO_3

Nouvelle approche performantielle de la durabilité

Projet national PerfDub

Les enjeux de la durabilité

- ✓ **Développer une réelle ingénierie du matériau Béton**
- ✓ **Intérêts écologiques et économiques**
- ✓ **Permettre la prescription de bétons normalisés intégrant des matériaux recyclés ou à faible impact environnemental**
  - Matériaux locaux
  - Co-produits industriels
  - Liants incorporant des sous-produits à faible émission de CO_2
- ✓ **Optimiser le coût global et la durabilité des ouvrages neufs**
- ✓ **Savoir requalifier les ouvrages anciens et optimiser la gestion de la maintenance**

Les 2 entrants pour définir un objectif de durabilité

Classes d'exposition

XC1 à XC4 :	**carbonatation**
XD1 à XD3 et XS1 à XS3 :	**chlorures**
XF1 à XF4 :	**gel**
XA1 à XA3 :	**attaques chimiques**
XH1 à XH3 (définies dans le guide du LCPC) :	**RSI**
XAR1 à XAR3 (définies dans FD P18-464)	**RAG**

Durée d'utilisation du projet (définie dans Eurocode 0)

« Durée pendant laquelle une structure ou une de ses parties est censée pouvoir être utilisée comme prévu en faisant l'objet de la maintenance escomptée, mais sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures »

Les 2 approches de la durabilité

1- L'approche prescriptive

Définit des spécifications en termes de moyen (nature et dosage des constituants)

2- L'approche performantielle

Le concept de performance équivalente du béton (comparative)

Il permet de modifier les exigences prescriptives (nature et dosage des constituants) sous réserve de prouver que le béton a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence pour un environnement donné

La méthode de conception performantielle (absolue)

Elle définit des stipulations en termes de résultats et donc de performances

L’approche prescriptive

Durabilité et durée d’utilisation des ouvrages

Il est désormais possible :

de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l’agressivité du milieu dans lequel se trouve l’ouvrage

d’optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d’utilisation souhaitée

L’approche prescriptive

NF EN 206/CN prend en compte la durabilité en s’appuyant sur la notion de classes d’exposition

Elle impose au Prescripteur de définir les actions dues à l’environnement auxquelles le béton de l’ouvrage ou de chaque partie d’ouvrage va être exposé pendant la durée d’utilisation de la structure

Ces actions dus à l’environnement sont regroupées en classe d’exposition

L’approche prescriptive

➔ **Une obligations de moyens selon la norme NF EN 206/CN**

La norme NF EN 206/CN (Béton - Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité) fournit des caractéristiques essentielle de conception de bétons durables en fonction de l’environnement

- Rapport eau/ciment maximal
- Classe de résistance minimale
- Teneur minimale en ciment
- Teneur minimale en air
- Autres prescriptions :

  granulats résistants au gel/dégel

  ciment résistant aux sulfates

L'approche prescriptive

Des exigences de composition liées aux classes d'exposition basée sur une durée d'utilisation du projet

De 50 ans dans la norme NF EN 206/CN

			X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1
		Rapport E_{eff}/liant éq maximal c)	–	0,65	0,65	0,60	0,60	0,55
		Classe de résistance minimale	–	C20/25	C20/25	C25/30	C25/30	C30/37
		Teneur mini en liant éq (kg/m^3) c) d)	150	260	260	280	280	330
		Teneur minimale en air (%)	–	–	–	–	–	–
		Essai(s) de performances m)	–	–	–	–	–	–
Combinaison CEM I + addition	Rapport maximal A/(A+C) l)	Cendres volantes	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		Fumées de silice	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		Métakaolin type A	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		Laitier moulu	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		Addition calcaire catégorie A	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,05
		Addition calcaire catégorie B	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,05
		Addition siliceuse de minéralogie QZ	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,15

L'approche prescriptive

De 100 ans dans le fascicule 65

Cahier des clauses technique

générales applicables aux marchés

publics de travaux de génie civil

			XC1	XC2	XC3	XC4	XS1
		Rapport E_{eff}/liant éq maximal [d]	0,60	0,60	0,55	0,50[l]	0,50
		Classe de résistance minimale [c]	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37[p]
		Teneur mini en liant éq (kg/m^3) [b] [c] [d]	280	280	300	330	330
		Absorption d'eau maxi pour les produits préfabriqués en usine (%)	6,5[m]	6,5[m]	6[m]	6[m]	5,5[m]
		Teneur minimale en air (%)	–	–	–	–	–
		Essai(s) de performances [k]					
Combinaison CEM I + addition	Rapport maximal A/(A+C)	Cendres volantes	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		Fumées de silice	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		Métakaolin type A	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		Laitier moulu classe A [s]	0,50	0,50	0,40	0,40	0,50
		Laitier moulu classe B ou C	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		Addition calcaire catégorie A	0,30	0,30	0,30	0,30	0,05
		Addition calcaire catégorie B	0,25	0,25	0,25	0,25	0,05
		Addition siliceuse de minéralogie QZ	0,25	0,25	0,25	0,25	0,15

L’approche performantielle

Le concept de performance équivalente du béton (comparative)

Il permet de modifier les exigences prescriptives (nature et dosage des constituants) sous réserve de prouver que le béton a une équivalence de performance avec celle d’un béton de référence pour un environnement donné

La méthode de conception performantielle (absolue)

Elle définit des stipulations en termes de résultats et donc de performances

L’approche performantielle - Principe

- Mesurer des indicateurs de durabilité qui correspondent aux performances réelles de durabilité du béton (propriétés de transfert, …)

- Les comparer :

  - soit à des seuils **(approche absolue),**

  - soit à ceux obtenus sur un béton formulé traditionnellement **(approche comparative)**

- Valider ainsi des formules qui dérogent aux limites de composition de l’approche prescriptive

L’approche performantielle - Intérêts

- Résoudre des contradictions (par ex.: XF4 et RSI)

- Développer l’innovation

- Ouvrir la porte à des bétons plus verts

- Eventuellement réduite les enrobages

L’approche performantielle – Indicateurs de durabilité

- Approche globale basée sur la notion d'indicateurs de durabilité

2 étapes majeures :

- **définition des indicateurs :**

  - porosité
  - perméabilité
  - diffusivité des ions chlorures

- **spécification de critères (seuils)** en fonction du **type d'environnement** et de la **durée de vie** considérés

L'approche performantielle absolue

Critères pour une durée d'utilisation de 100 ans

Classe d'exposition	Seuil à 90 jours	Exemples de partie d'ouvrages
Carbonatation -**XC1** sec ou humide en permanence -**XC2** humide rarement sec	P_{eau} < **15** %	Fondations
Carbonatation -**XC3** humidité modérée -**XC4** alternance d'humidité et de séchage	P_{eau} < **13** % Kgaz<**150**.$10^{-18}m^2$	Bétons protégés par étanchéité Bétons exposés à l'air
Corrosion par les chlorures -**XS1** exposé à l'air véhiculant du sel marin -**XS2** immergée dans l'eau de mer	P_{eau} < **13** % Dapp<**7**.$10^{-12}m^2/s$	Ouvrage à proximité d'une côte Partie immergée eau de mer
Corrosion par les chlorures -**XS3** zones de marnage -**XD3** humidité/ séchage, projections Cl^-	P_{eau} < **11** % Kgaz<**150**.$10^{-18}m^2$ Dapp<**3**.$10^{-12}m^2/s$	Zones de marnage Projection de sels déverglaçage

Exemple – Arsenal de Brest

Durée de vie 100 ans

Risques:

- corrosion des armatures par les chlorures
- attaques chimiques (produits de nettoyage) XA3

Exemple – Arsenal de Brest

Indicateurs de durabilité utilisés :

- **perméabilité au gaz**
- **porosité à l'eau**

Formulation : C35/45 (CEM V)

Exploitation (comparative)

	C35/45 Contrat	C35/45 Variante
Dosage en ciment (kgm³)	**385**	**315**
Porosité (%)	**15,6**	**13,0**
Perméabilité à l'oxygène (10^{-18} m²)	**43,9**	**28,7**

Exemple de réalisation – durée de vie de 120 ans

Pont Vasco de Gama sur le Tage (Lisbonne – Portugal)

Merci pour votre attention

- **Loïc Divet**
- loic.divet@univ-eiffel.fr
- 01 81 66 81 48

Université Gustave Eiffel