

Maladies des bétons: entre fatalité et prise en charge

Luc COURARD (Luc.Courard@ulg.ac.be)

Université de Liège

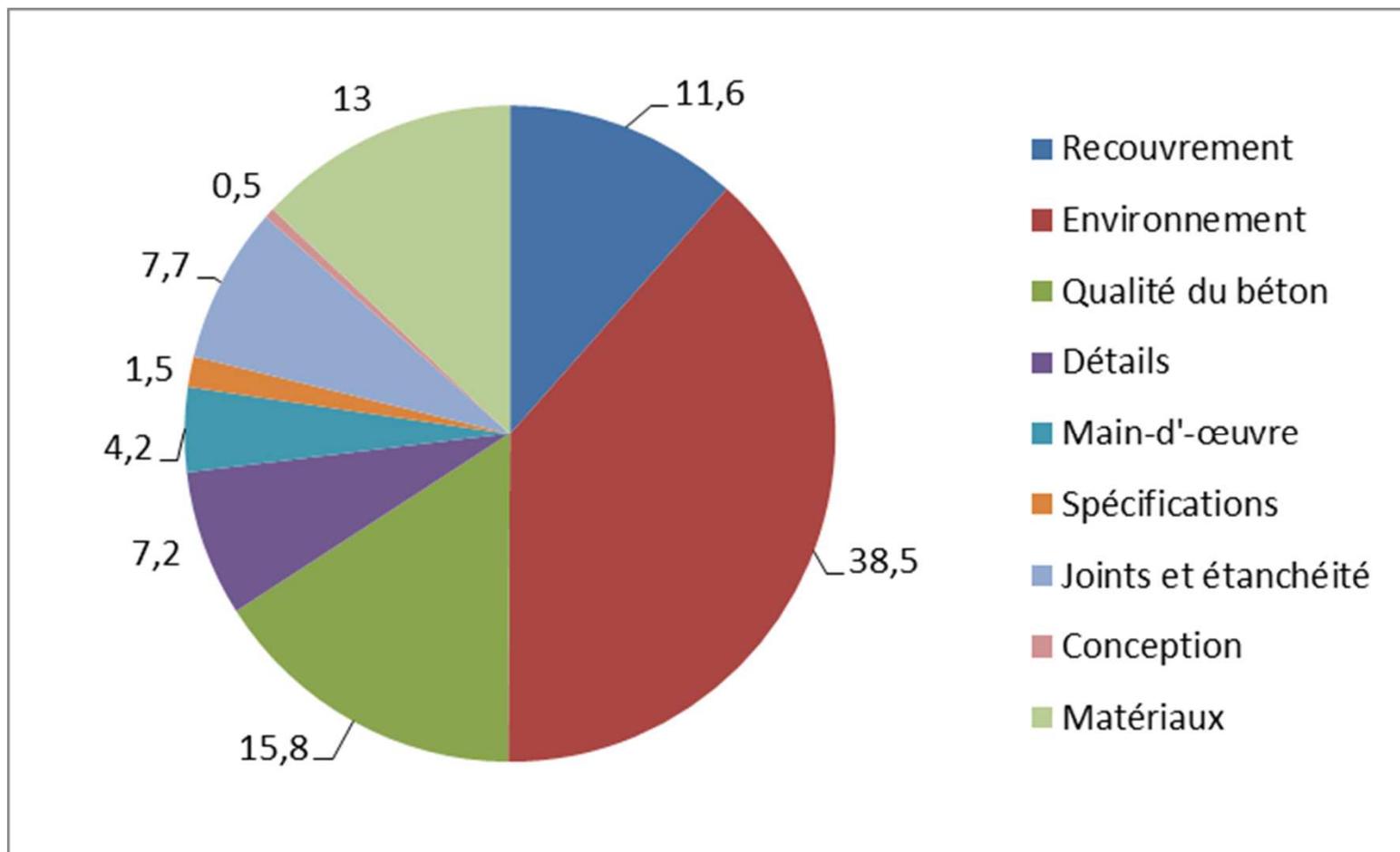
Département d'Architecture, Géologie , Environnement et Constructions

Services techniques, Bruxelles, 21 mars 2016

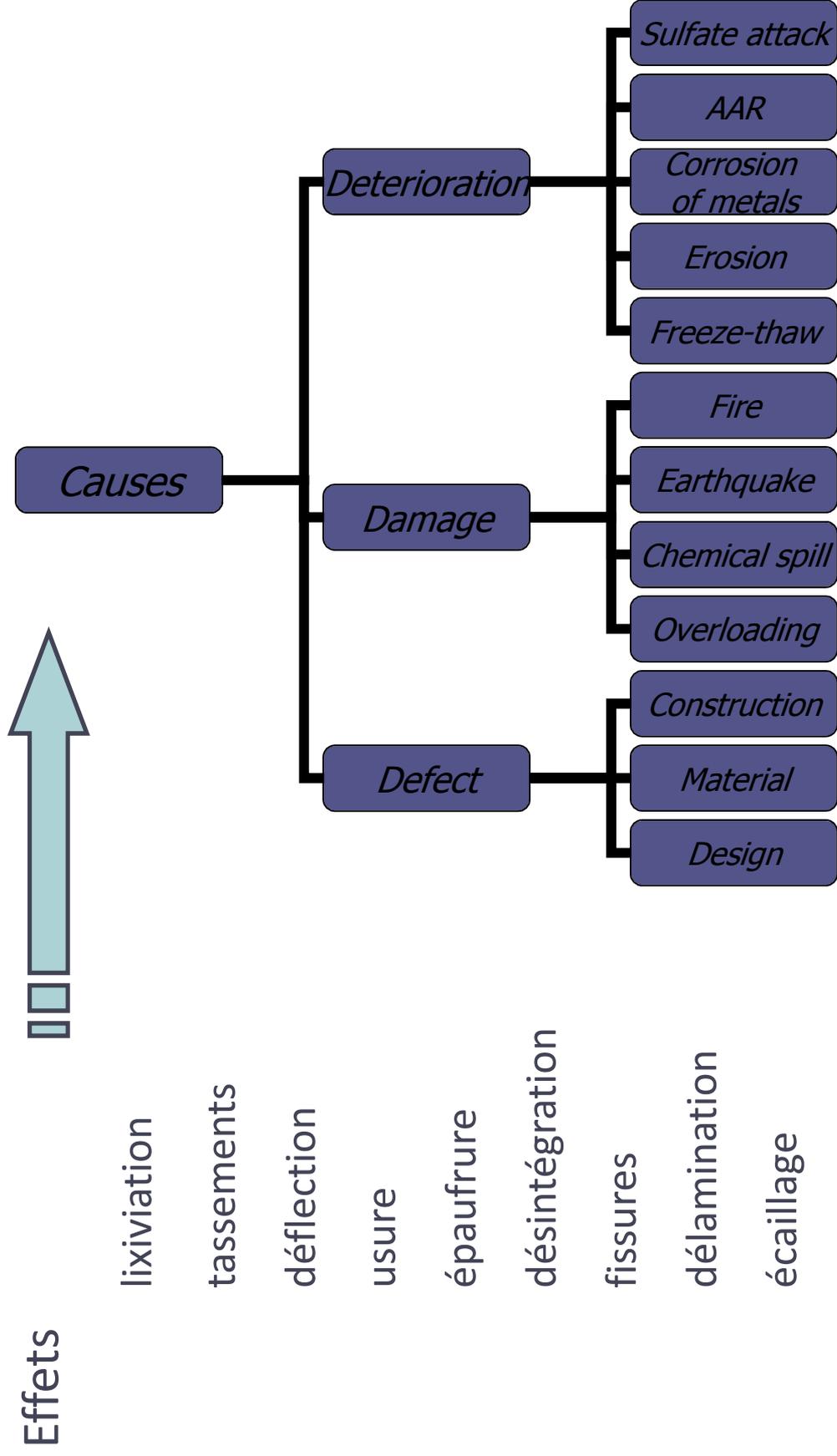
Situation actuelle



Facteurs contribuant à la dégradation des structures en béton (BCA, 1997)



Pathologies



Pathologies

Principaux effets

épaufrure

désintégration

fissures

Cause première: **eau**

Causes secondaires

corrosion des armatures

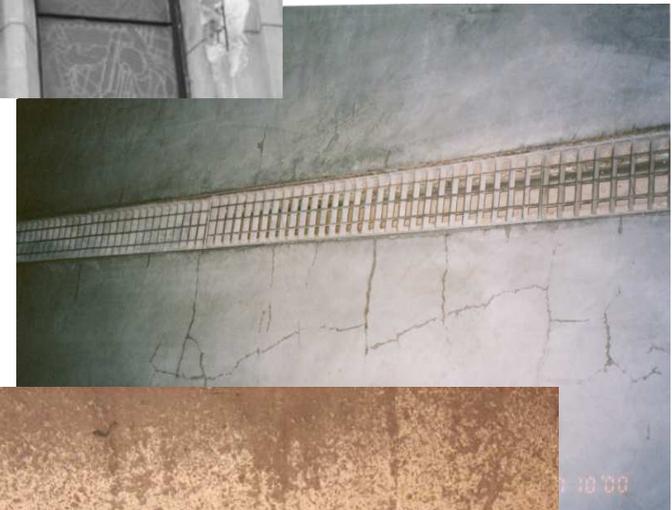
mécanismes de désintégration

effets de la température

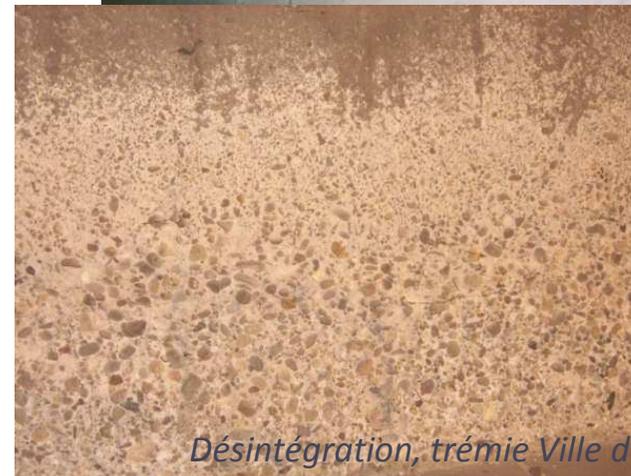
fautes de conception ou de réalisation



Epaufures, église Saint-Vincent, Baie du Chœur (NO)



*Fissures de retrait
(Photo B. Chmilievska)*



Désintégration, trémie Ville de Liège

Sommaire

La porosité des bétons

Les défauts

La corrosion des armatures

Les mécanismes de désintégration

L'effet du gel-dégel et des sels de déverglaçage

Les principes des réparations

La qualité en réparation

Conclusions

La porosité des bétons

Le béton durci est un matériau :

Composite

Poreux (perméabilité)

Hydrophile (absorption et adsorption d'eau)

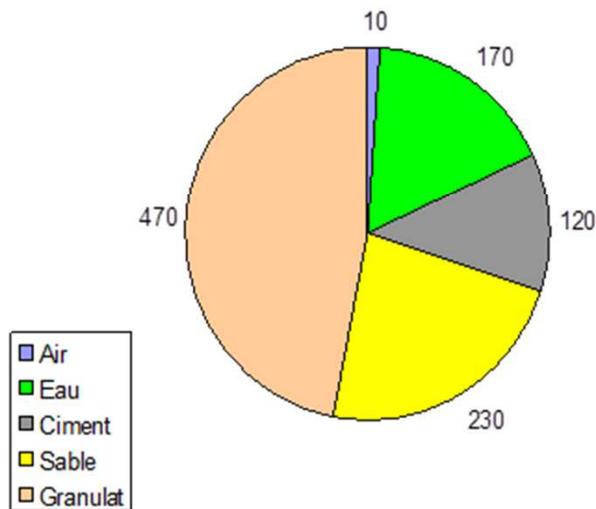
Évolutif (définir l'âge du béton)

Fragile (voir l'allongement à la rupture)

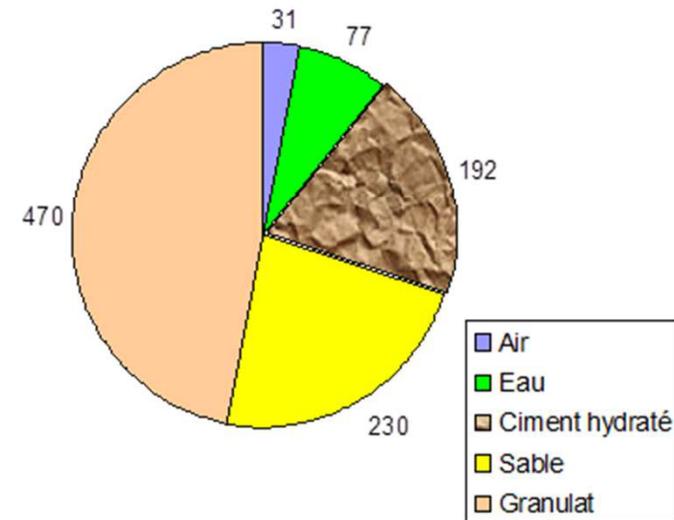
La porosité des bétons

Composition en volume absolu (pour 1m³)

Composition du béton (en litres) avant hydratation

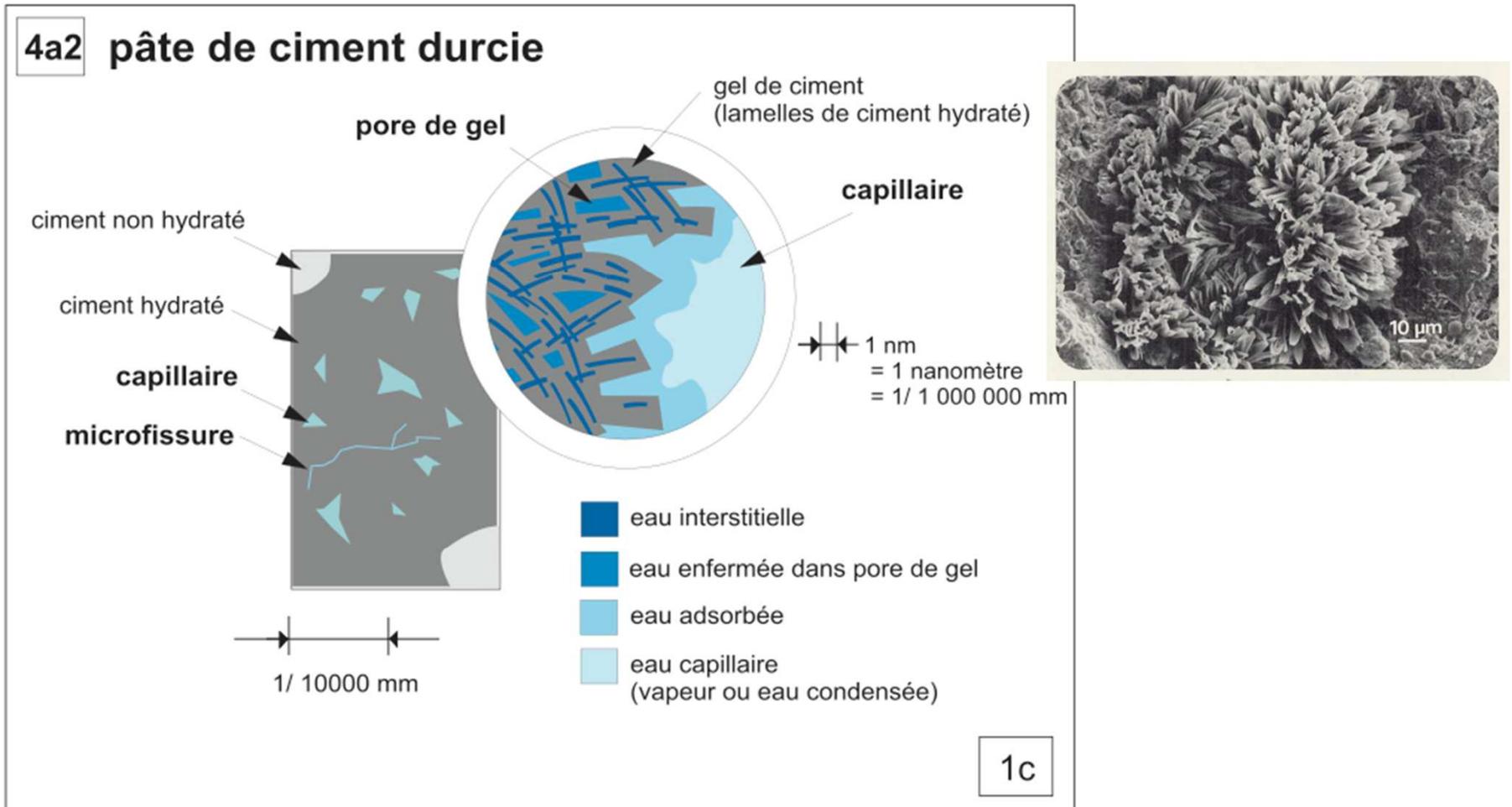


Composition du béton (en litres) après hydratation complète



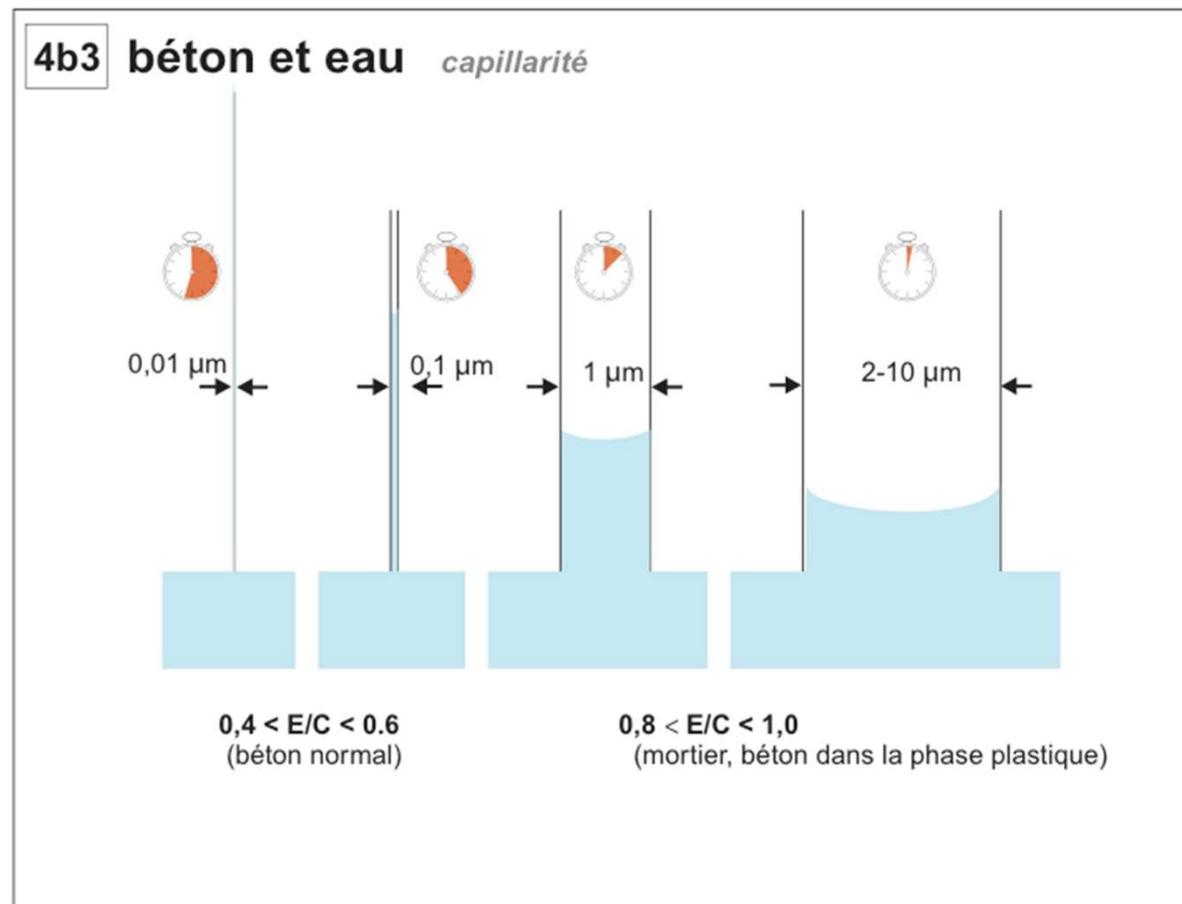
1 m³ = 700l de granulats + 200l de pâte de ciment + 100l de capillaires

La porosité des bétons



La porosité des bétons

Porosité capillaire (en fonction de E/C)



Relations de cause(s) à effet(s)

Causes des dégradations	Effets			
	Fissure	Epaufrure	Désagrégation	Activité
A. Causes survenant avant durcissement :				
1) ségrégation du béton	x			x
2) ressuage	x			x
3) retrait à l'état plastique	x			x
B. Causes survenant au début et pendant le durcissement				
1) modification du support ou du coffrage	x	x		x
2) effet du gel sur béton jeune	x	x	x	x
3) retrait	x			x
C. Causes survenant après durcissement :				
1) effet thermique				
- déformation empêchée/différentielle	x	x		xx
- gel/dégel		x	x	xx
- incendie	x	x	x	x
2) effet de l'eau				
- effet absorption d'eau/séchage (+ déformation empêchée ou différentielle)	x	x		xx
3) effet chimique				
- attaque en surface			x	xx
- réaction chimique avec expansion	x	x	x	xx
4) corrosion des armatures	x	x		xx
5) surcharge mécanique/ concentration de tension				
- statique	x	x		xx
- dynamique	x	x		xx
- impact et tremblements de terre	x	x		x
- érosion			x	xx

Défauts de construction

Recouvrement des armatures: de l'ordre de 15mm

Compaction: par piquage → nids de gravier

Ségrégation, reprise de bétonnage

Retrait plastique, tassement plastique

Défauts de pente (évacuation de l'eau)

ségrégation



reprises de bétonnage



tassement plastique



retrait plastique

Défauts structurels

Tassement différentiel

Dilatation thermique

Surcharges accidentelles (neige, tremblement de terre)

Infiltration d'eau

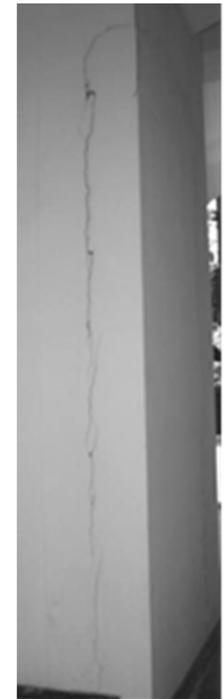


*Humidité au plafond
(église Saint-Vincent)*

*Fissure dans la partie centrale
du linteau (Orientation Est,
église Saint-Vincent)*

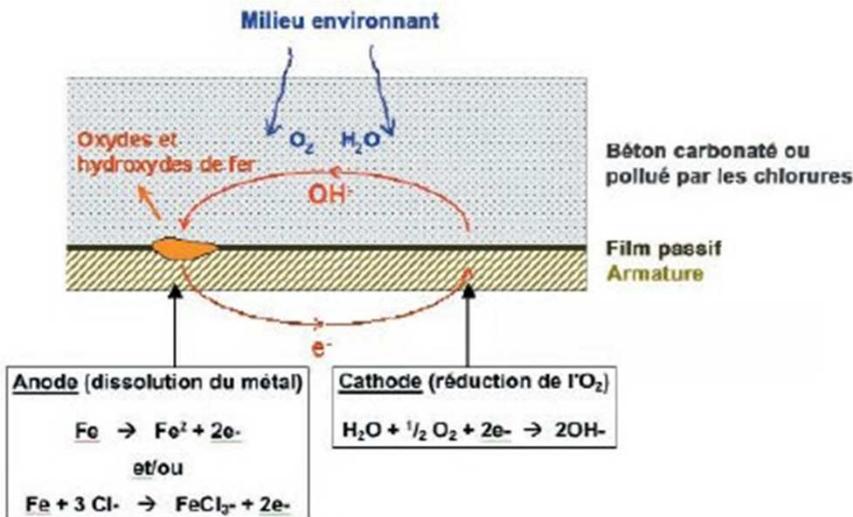
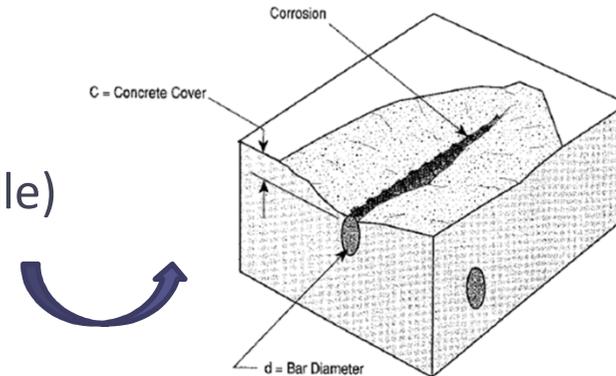
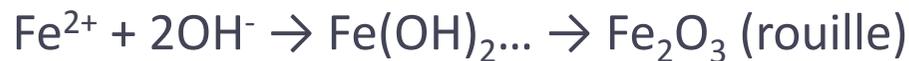
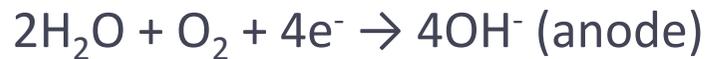


*Fissuration
verticale dans un
pilier (Abside SO,
église Saint-
Vincent)*



Corrosion des armatures

Les réactions sont les suivantes :



Corrosion par carbonatation

Apparition d'épaufrures (église Saint-Vincent, Liège)



Structure en béton armé supportant le dôme



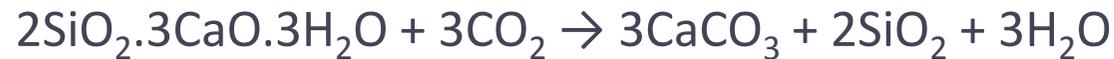
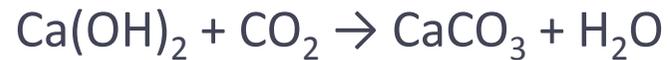
Epaufures sous un appui de fenêtre

Epaufure dans la pierre armée Pauchot (cage d'escaliers)



Corrosion par carbonatation

Réactions chimiques



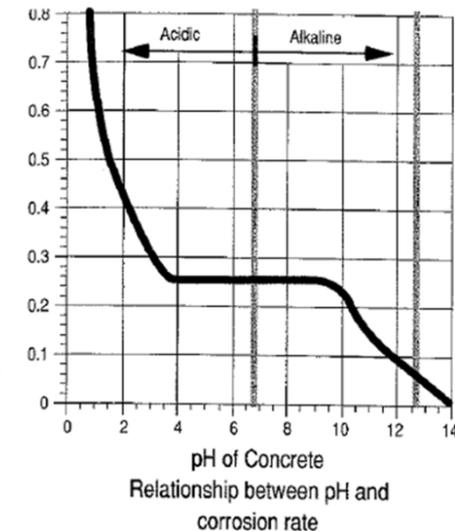
Effets

Résistance en compression ↑

Porosité ↓: $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ avec ↑ volume 11%

pH ↓ à cause de la consommation de Ca(OH)_2

Taux de corrosion (mm/an)



Corrosion par carbonatation

Evolution

$$s = k \cdot \sqrt{t}$$

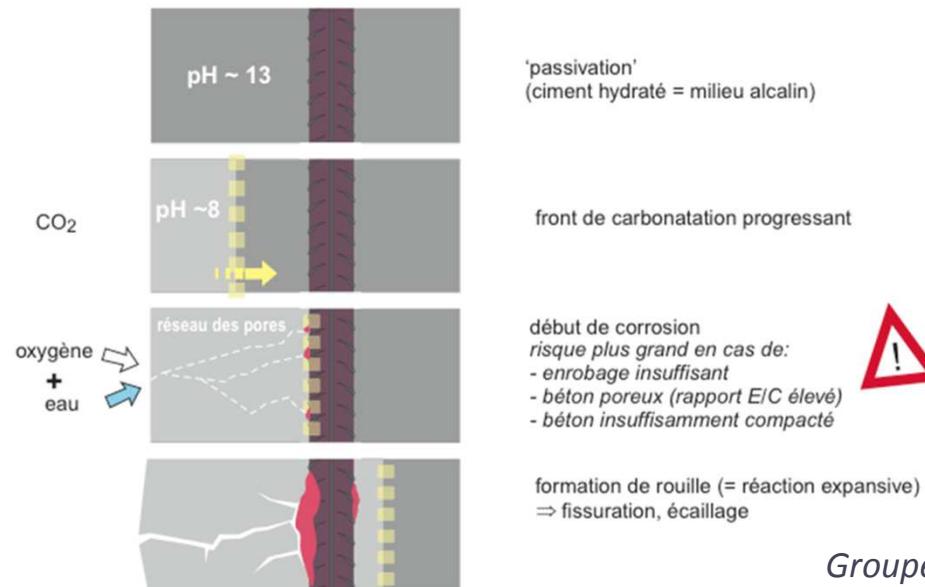
s = profondeur de carbonatation

t = temps

k = constante

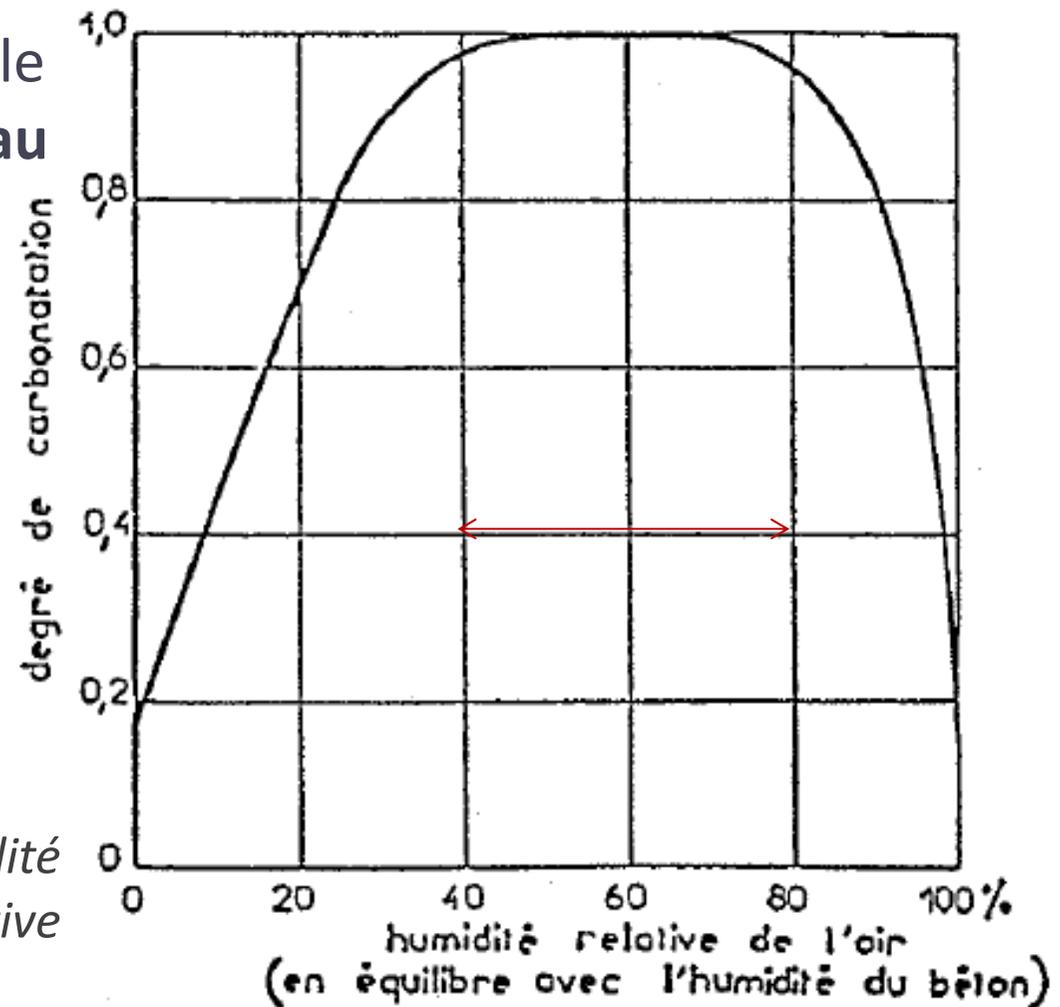


4b4 carbonatation *corrosion des armatures*



Corrosion par carbonatation

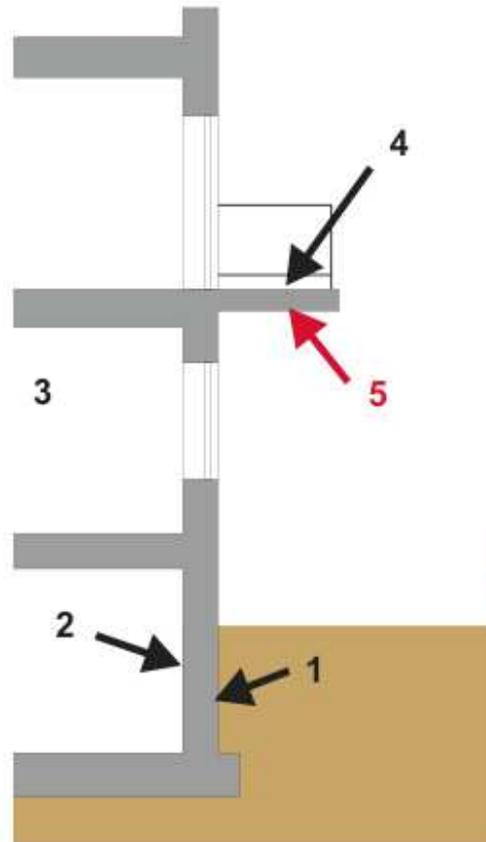
Pour réagir avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$, le CO_2 doit être ionisé \rightarrow l'eau est indispensable



Carbonatation et humidité relative

Corrosion par carbonatation

4b4 carbonatation *risque de corrosion: cas concrets*

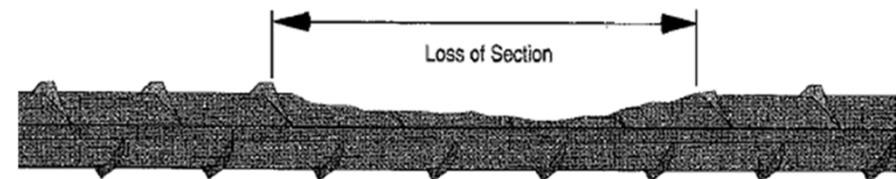


- 1- sous terre ou sous eau:
carbonatation limitée (peu ou pas de CO_2)
⇒ pas de corrosion
- 2- cave:
carbonatation avec effet favorable: bouche-pores
- 3- espace intérieur:
faible humidité ambiante
⇒ pas de corrosion
- 4- à l'extérieur mais non couvert
en cas de pores très fins:
⇒ peu d'oxygène au droit des barres
⇒ faible risque de corrosion
- 5- **à l'extérieur et couvert:**
pores tantôt remplis d'eau (humidité de l'air),
tantôt secs (contact avec l'oxygène)
⇒ **risque de corrosion !**
(en cas de béton poreux ou
d'enrobage insuffisant)

Corrosion par les chlorures

Corrosion par piqûres

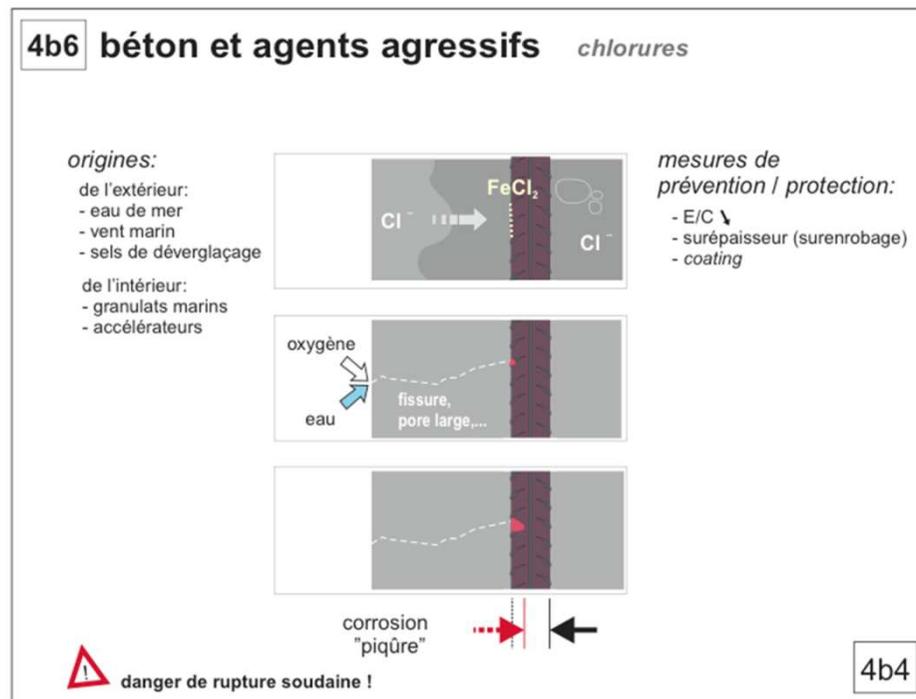
formation de FeCl_2
réduction de la capacité structurale
taches et coulures de rouille



CSTC, 2008

Corrosion par les chlorures

Corrosion par les chlorures (Bains de la Sauvenière, arch. G. Dedoyard, 1942)



Groupement
Belge du Béton

Bains de la Sauvenière

Corrosion par les chlorures

Chlorures provenant de

l'environnement: eau de mer, sels de déneigement

l'intérieur

CaCl_2 comme accélérateur de prise

« Ingrédients » naturels avec les granulats (sable de dunes) ou l'eau (eau de mer)



Police fédérale, Saint-Léonard, 2006



Corrosion par les chlorures

Teneur admissibles en ions chlorures

EN 206-1: 2000

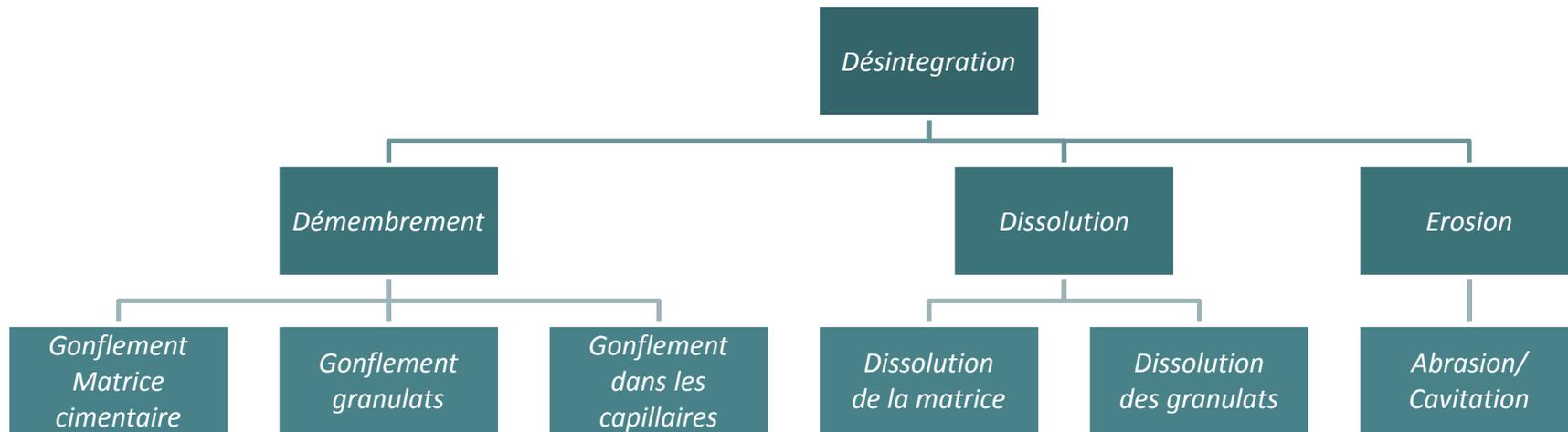
Utilisation du béton	Classe de chlorures	Teneur maximum en Cl rapportée à la masse de ciment
Ne contenant ni armature en acier ni pièces métalliques noyées	Cl 1,0	1%
Contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	Cl 0,20	0,20%
	Cl 0,40	0,40%
Contenant des armatures de précontrainte en acier	Cl 0,10	0,10%
	Cl 0,20	0,20%



Contexte belge

Les mécanismes de désintégration

Mécanismes de désintégration



Les mécanismes de désintégration

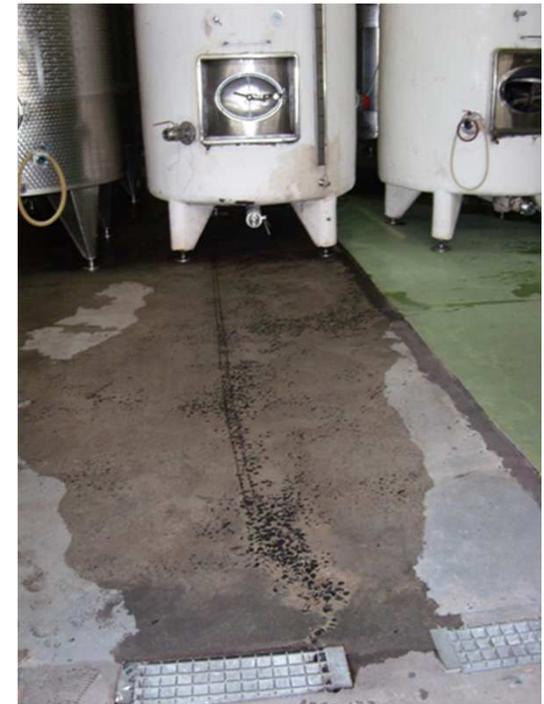
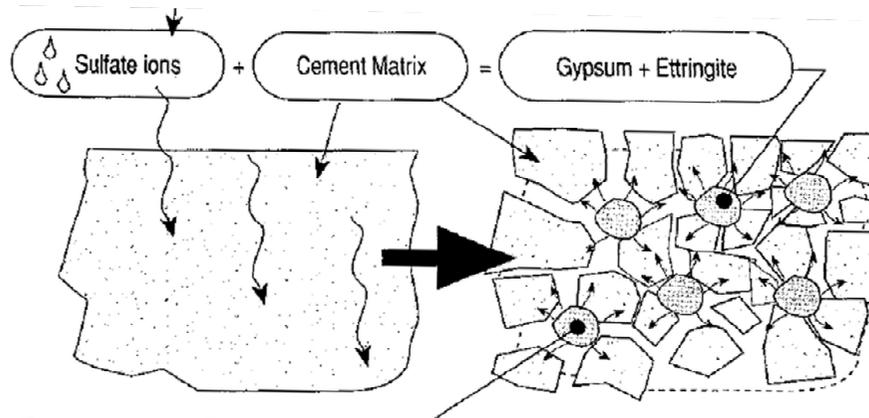
Mécanismes de désintégration

Exposition à des substances chimiques agressives

réaction acide + base \rightarrow sel + eau

Attaque sulfatique

production d'ettringite secondaire



Cuves à vin - Afrique du sud, 2008

Les mécanismes de désintégration

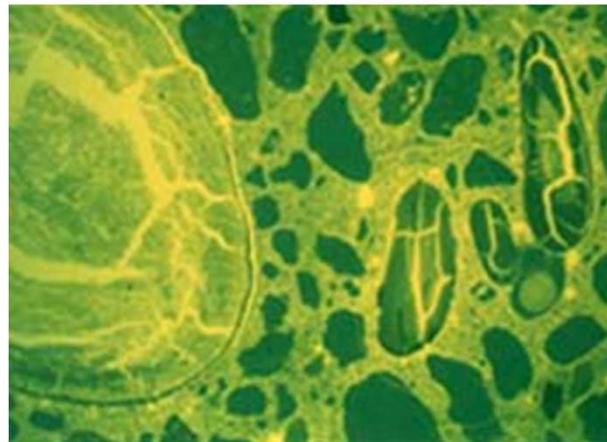
Mécanismes de désintégration

Attaque bactérienne

production d'acide sulfurique + sulfates

Réaction alcali-silice

réaction entre les granulats
siliceux et les alcalins du ciment

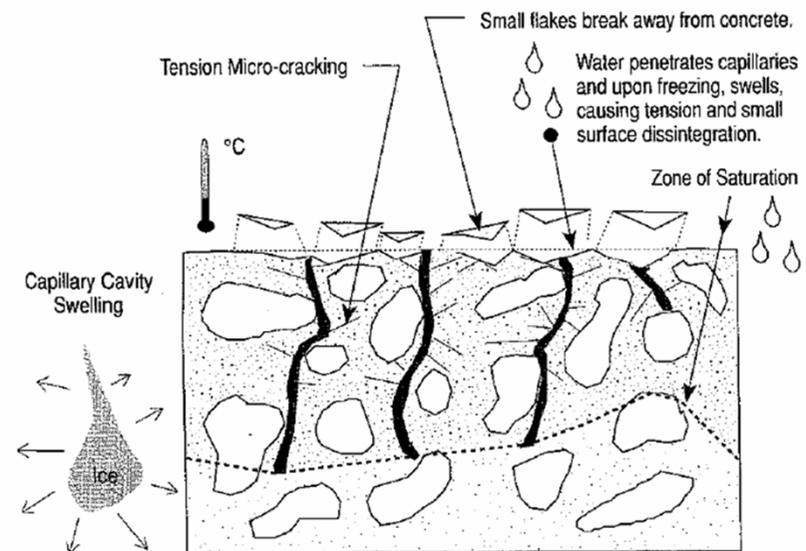


Les mécanismes de désintégration

Effet du gel

Eau: rare élément à avoir un volume plus important à l'état solide qu'à l'état liquide (pour une masse équivalente).

La masse de l'eau ne change pas quand elle se solidifie mais son volume varie et augmente d'environ 10 %.



Les mécanismes de désintégration

Effet du gel

Mise en traction de la couche superficielle du béton

Fissuration



4b5 béton et gel *mécanisme de dégradation*



1- pores larges
(béton jeune ou de qualité médiocre)
saturés d'eau

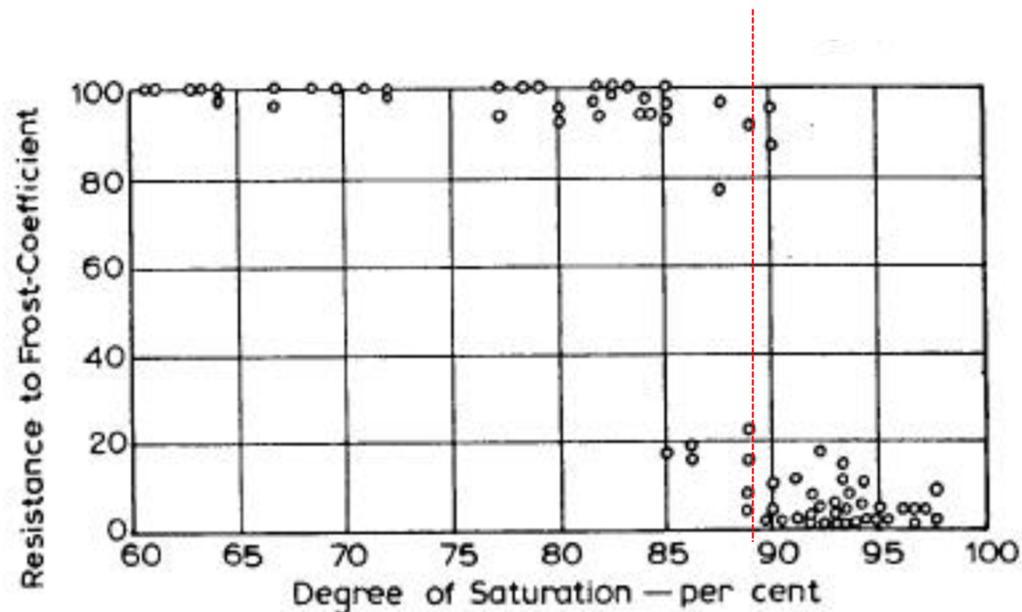


2- en cas de gel soudain: écaillage ('scaling')



Les mécanismes de désintégration

Effet du gel-dégel: un béton n'est dégradé par le gel que s'il est entièrement saturé d'eau ou proche de la saturation

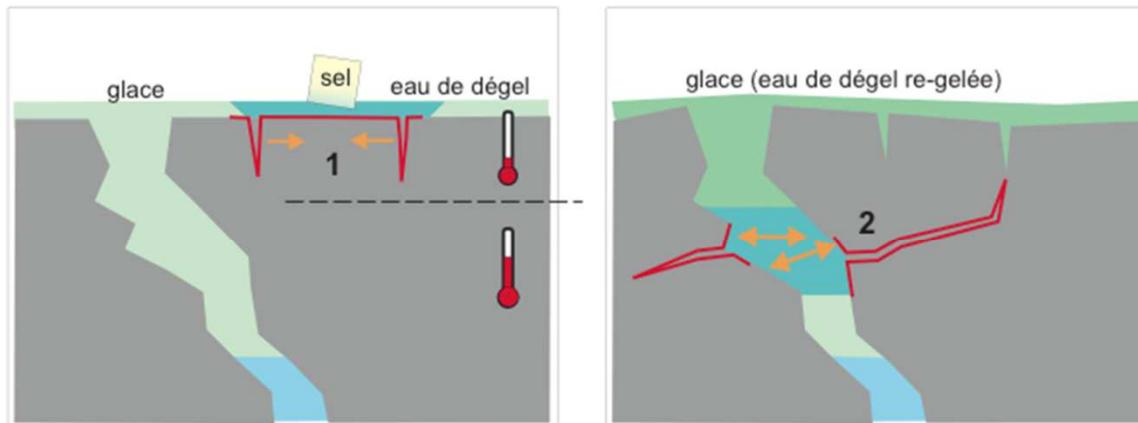


Influence du degré de saturation d'un béton sur sa résistance au gel.
[tiré de Neville, A. M. *Properties of concrete*, 3e édition, Longman Scientific & Technical, Harlow Essex, 1991].

Les mécanismes de désintégration

Effets des sels de déverglaçage

4b5 béton et gel *sels de déverglaçage - mécanismes de dégradation*



1- dissolution des sels et fusion de la glace
(*réaction endothermique*)
⇒ refroidissement brusque du béton
de surface (*choc thermique*)
⇒ contraintes de traction, fissuration...

2- gel de l'eau enfermée
⇒ expansion empêchée
⇒ fissuration, écaillage...

Les mécanismes de désintégration

Effet des sels de déverglaçage



Les principes des réparations

Concrete properties
Removal deteriorated concrete
Cleaning after removal
Surface properties
Surface preparation
Bonding agents
Mechanical devices across the interface
Concrete placement
Concrete curing
Time dependance
Traffic, ..

(Silfwerbrand, 2004)

Cinq conditions fondamentales

**Méthode de préparation
du béton support**

Absence de laitance

**Propreté avant
placement de la
réparation**

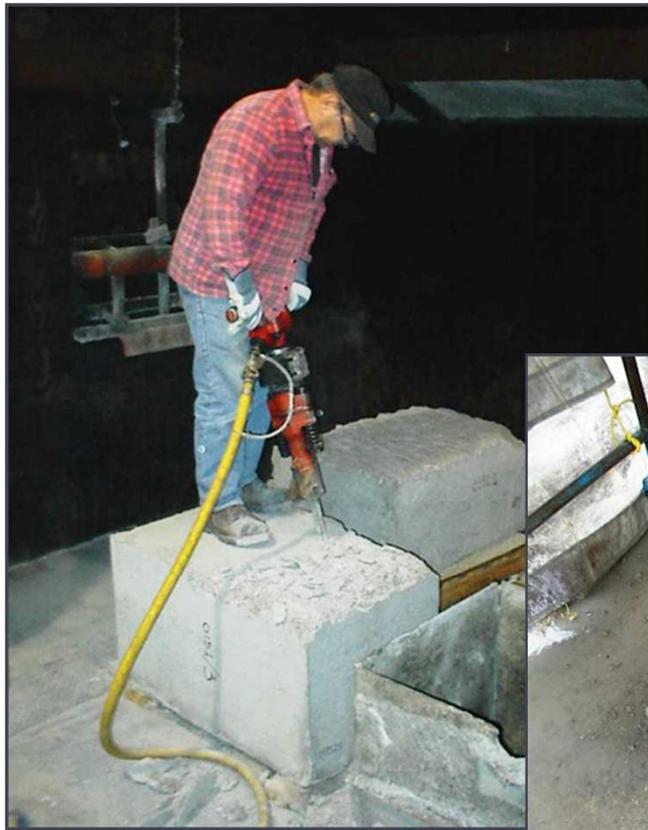
**Compaction du produit
de réparation**

**Cure du produit de
réparation**

Les principes des réparations

Compatibilité

Préparation de la surface

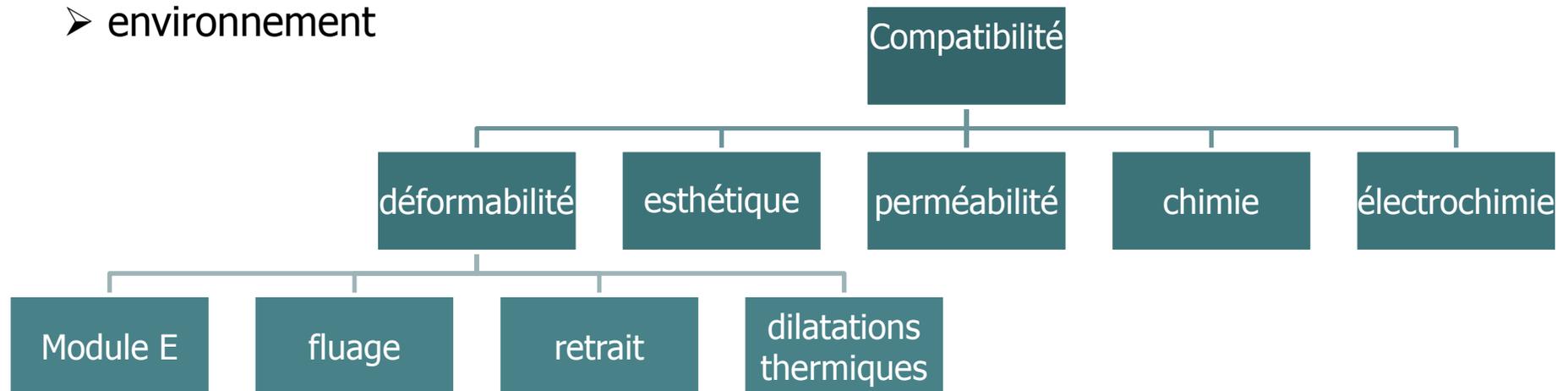


Les principes des réparations

Compatibilité

... 3 éléments:

- substrat
- matériau de réparation
- environnement



Les principes des réparations

Compatibilité

Compatibilité chimique

- Contenu en alcali (RAG): réparation avec matériaux à faible teneur en alcali si béton support avec granulats potentiellement réactifs
- Contenu en C_3A
 - Ciment HSR
- Teneur en chlorures
 - Protection des armatures
 - Matériaux de réparation à pH élevé

Les principes des réparations

Compatibilité

Compatibilité électrochimique

- Résistivité électrique
- pH

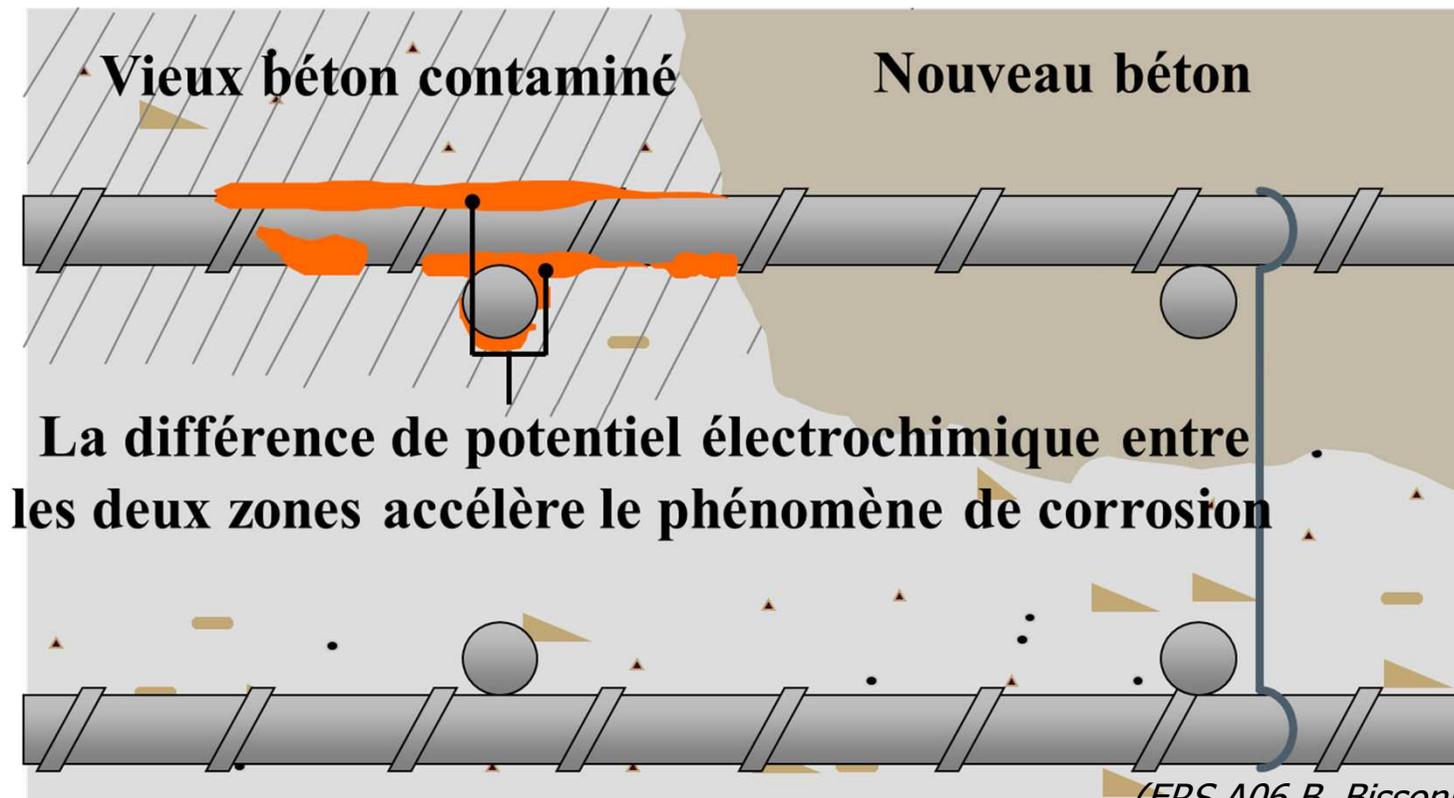
La réparation d'une partie seulement d'une large zone anodique peut augmenter le rapport cathode/anode et accélérer considérablement le processus de corrosion à la périphérie de la zone réparée

Les principes des réparations

Compatibilité

Compatibilité électrochimique

- Réparation isolée (« rapiécage »)



(ERS A06 B. Bissonnette, 2006)

Les principes des réparations

Compatibilité

Facteurs influençant la stabilité dimensionnelle

- Retrait de séchage
- Coefficient de dilatation thermique
- Module d'élasticité
- Fluage

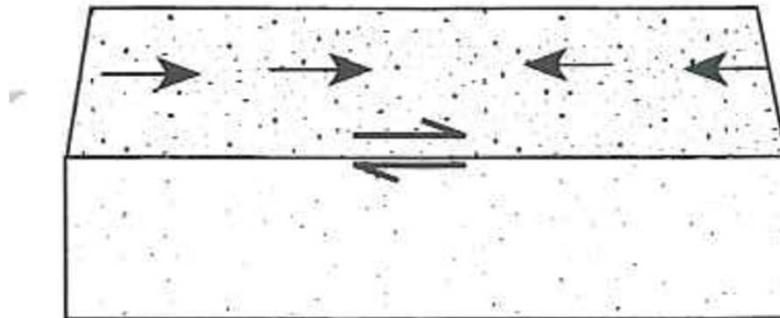
Changements volumétriques → cisaillement aux interfaces

Les principes des réparations

Compatibilité

Retrait de séchage

- Evaporation de l'eau
- Contraintes de traction dans le revêtement
- Fissures si contraintes de traction $>$ résistance en traction



Le retrait au séchage est un des principaux paramètres contrôlant la durabilité des réparations de surface



**Examples of
Restrained Drying
Shrinkage**



Réparations?



Réparations?



Les principes des réparations

Compatibilité

Comment diminuer le retrait au séchage ?

- Diminuer la quantité de pâte (augmenter la teneur en granulats)
- Diminuer la quantité d'eau
- Assurer un bon mûrissement
- Diminuer le rapport surface/volume

Choix des matériaux *vs* retrait

- Matériaux avec faible retrait de séchage (<0.05%)
- Gros granulats (si épaisseur suffisante)

Systeme de certification

Principe du démarrage de la certification de processus:

<u>Domaine d'activité</u>	Réparation du BÉTON CARBONATÉ
<u>Techniques appliquées</u>	Réparation manuelle Réparation mécanique
<u>Catégorie d'entreprise</u>	Niveau A
<u>Documents</u>	PTV 560-01

Prescriptions techniques pour entreprises qui effectuent des travaux de réparation et de protection du béton carbonaté par voie manuelle ou mécanique

.....

4. Exigences pour l'entreprise

4.1. Exigences d'organisation générale

4.2. Exigences d'exécution des travaux certifiés

4.3. Exigences pour les exécutants

4.4 Exigences d'information de l'organisme de certification

La qualification des opérateurs

Sessions de 2 jours

- Formation théorique (2 x 1/2 jours)
 - Principes et techniques de réparation du béton, ,matériaux de réparation - types de mortiers, contrôle, sécurité et santé, aspects environnementaux
 - Manuel **La réparation du béton (formation pour ouvriers)**
- Formation pratique (1/2 jour)
 - Application de mortier de ragréage sur dalle au plafond
 - basé sur l'annexe 4.3.1.1. du PTV BPC 560-01 pour les entreprises qui effectuent des travaux de réparation et de protection du béton

La qualification des opérateurs

Test de qualification (1/2 jour)

- Examen théorique
- Examen pratique
 - Application sur dalle au plafond
 - Critère de PLANEITE : défaut de planéité < 2mm
 - Critère de CONTINUITE : absence de fissuration
 - Critère d'ADHERENCE : > 1,5 MPa à 28 j. (classe R3)





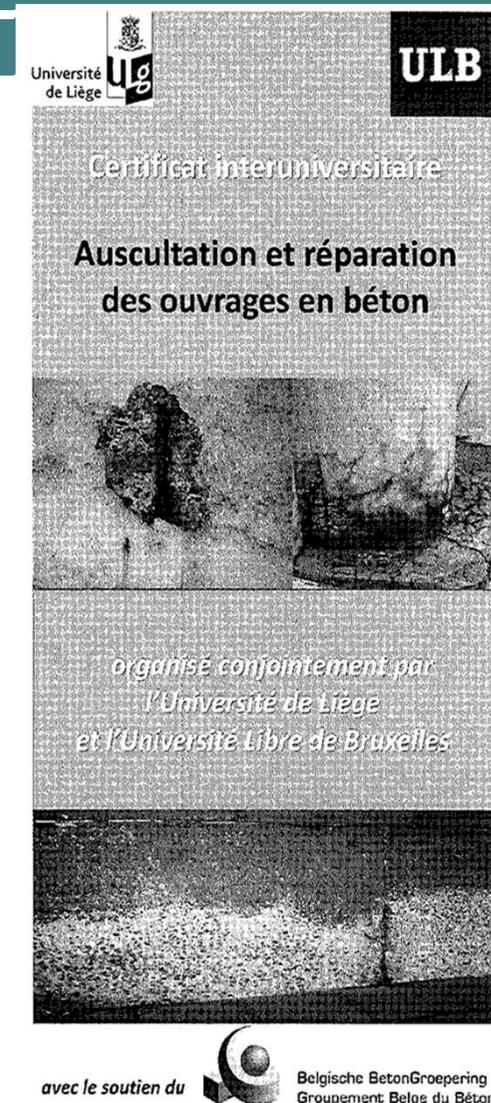




La qualification des opérateurs

Formation universitaire

- connaissance approfondie du matériau béton
- étude systématique des pathologies des structures en béton (ouvrages d'art et structures routières)
- études des techniques destructives et non destructives pour l'auscultation
- analyse des produits et techniques de réparation
- analyse de la certification et de la normalisation



Conclusions

Importance du diagnostic

Inspection générale

Inspection visuelle

Examen global

Inspection spécifique (expertise)

Corrosion

Intégrité du support

Résistance

Contamination chimique

Qualité des travaux et des travailleurs

**Prévoir un
budget !**



Merci

Mulțumesc

Takk

Hvala

Dziękuję

Dank u

Grazie

Danke

Gratias

Arigato

Efkaristos