

école _____
normale _____
supérieure _____
paris-saclay _____

université
PARIS-SACLAY

Approche performancielle de la durabilité des bétons

*M2R ECD – Eco-conception et construction durable
Vendredi 6 décembre 2024*

Camille Martin--Cavallé
cmartinc@ens-paris-saclay.fr

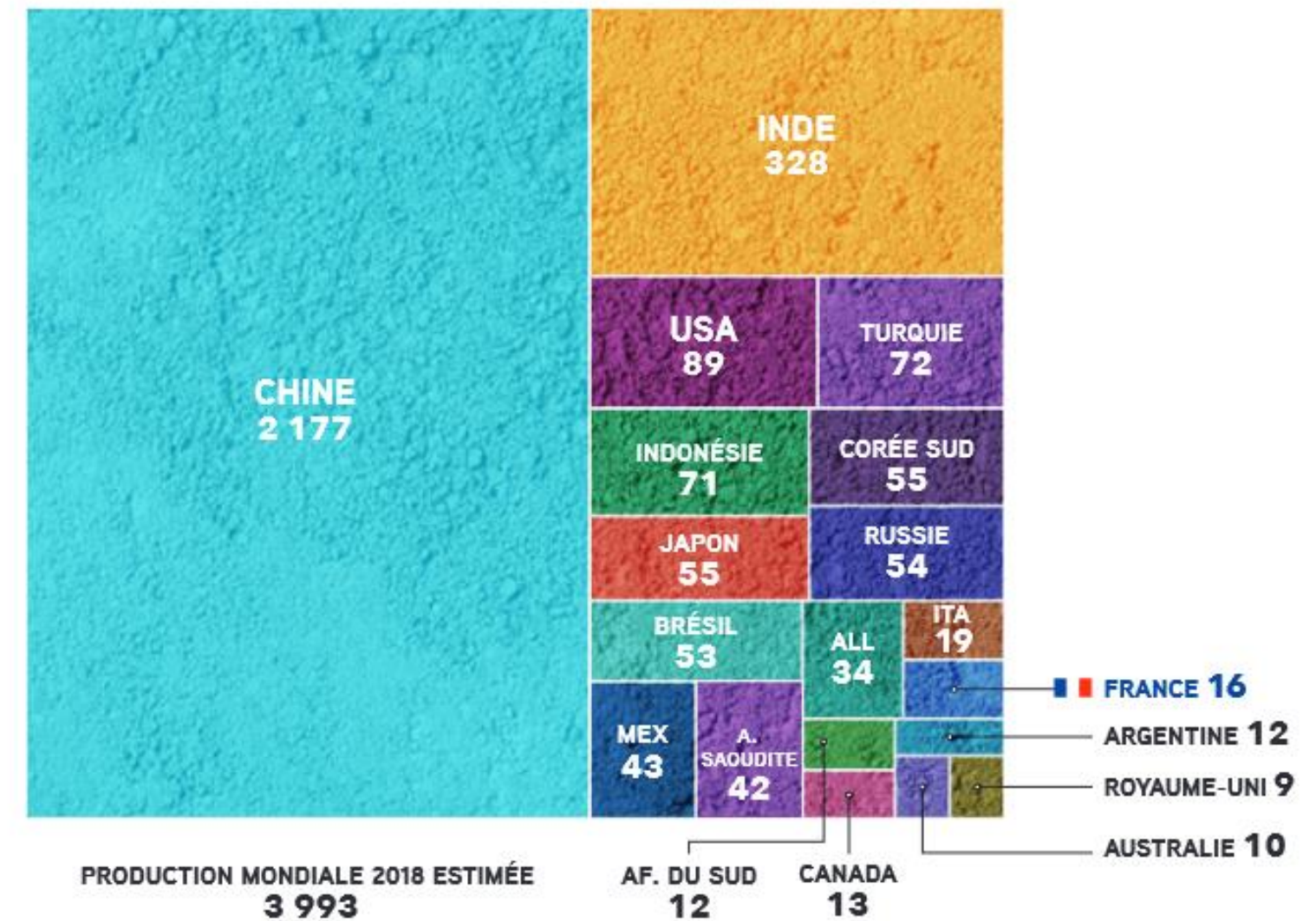
Impact environnemental du béton

5 % des émissions globales de CO₂
due à la production de ciment Portland

4 GigaTonnes
de ciment produit dans le monde



LA PRODUCTION DE CIMENT DANS LE MONDE 2018
En millions de tonnes



Sources : CEMBUREAU, US Geological Survey, Global Cement Report, Global Cement Directory

→ Développement de bétons alternatifs pour réduire l'impact environnemental du béton

Développement de bétons alternatifs

Exemple : utilisation de co-produits coquilliers

16 millions de tonnes de déchets

sous forme de co-produits coquilliers dans le monde

*La France est le **premier producteur d'huîtres en Europe***



Coquilles d'huîtres accumulées dans un port de pêche à Arès (33)

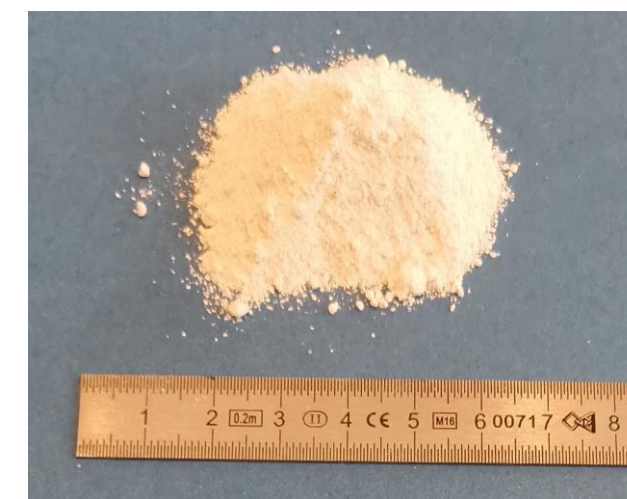
- Valoriser des sous-produits de l'aquaculture considérés comme des déchets
- Limiter le besoin en ressources naturelles

Coquilles concassées de taille 4/10 mm ou 0/4 mm



Remplacement des gravillons dans les bétons

Poudre de coquilles



En remplacement du sable
En remplacement du ciment

Développement de bétons alternatifs

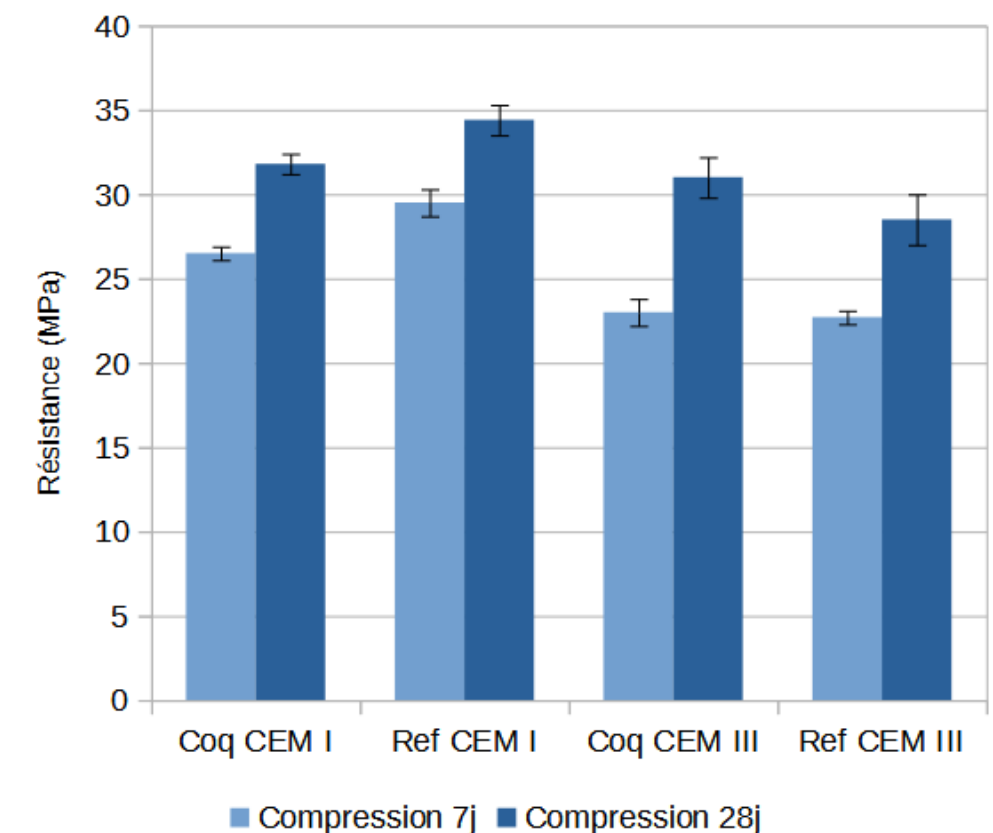
Exemple : utilisation de co-produits coquilliers

Formulations de béton avec 50 % des gravillons remplacés par des coquilles d'huîtres avec deux ciments différents un CEM I (ciment Portland classique) et un CEM III (ciment avec laitier de haut fourneau)

→ On peut atteindre le même affaissement et une même résistance mécanique



| Notation | Ref CEM I | Coq CEM I | Ref CEM III | Coq CEM III |
|-------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| Affaissement (cm) | 9,0 | 10,1 | 10,5 | 9,5 |
| Air occlus (%) | 2,9 | 4,1 | 2,8 | 3,8 |



→ Comment peut-on caractériser ces bétons en terme de durabilité ?

Questions :

→ **quelles sont les pathologies que peut subir le béton au cours du temps ?**

→ **quelle approche peut-on utiliser pour caractériser la durabilité des bétons ?**

→ **quel est le contexte normatif associé pour des bétons standards ? Et pour des bétons alternatifs comme les bétons de coquilles ?**

Sommaire

I – Pathologies des bétons

II – Normes et approche performantielle

III – Indicateurs de durabilité

IV – Prédiction de la durée de vie des ouvrages

école _____
normale _____
supérieure _____
paris – saclay _____

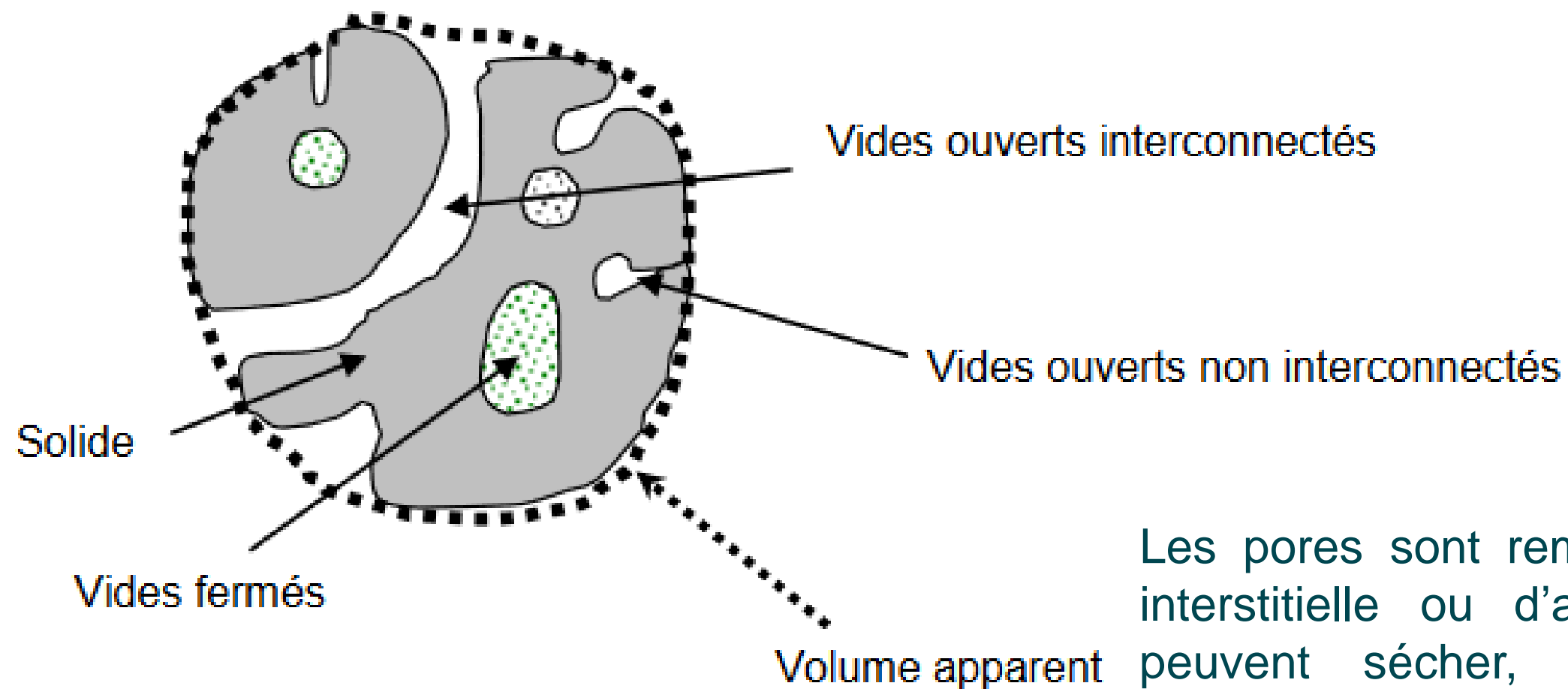
université
PARIS-SACLAY

Pathologies des bétons

Description de la microstructure d'un béton

Béton : ciment+ eau + sable + granulats

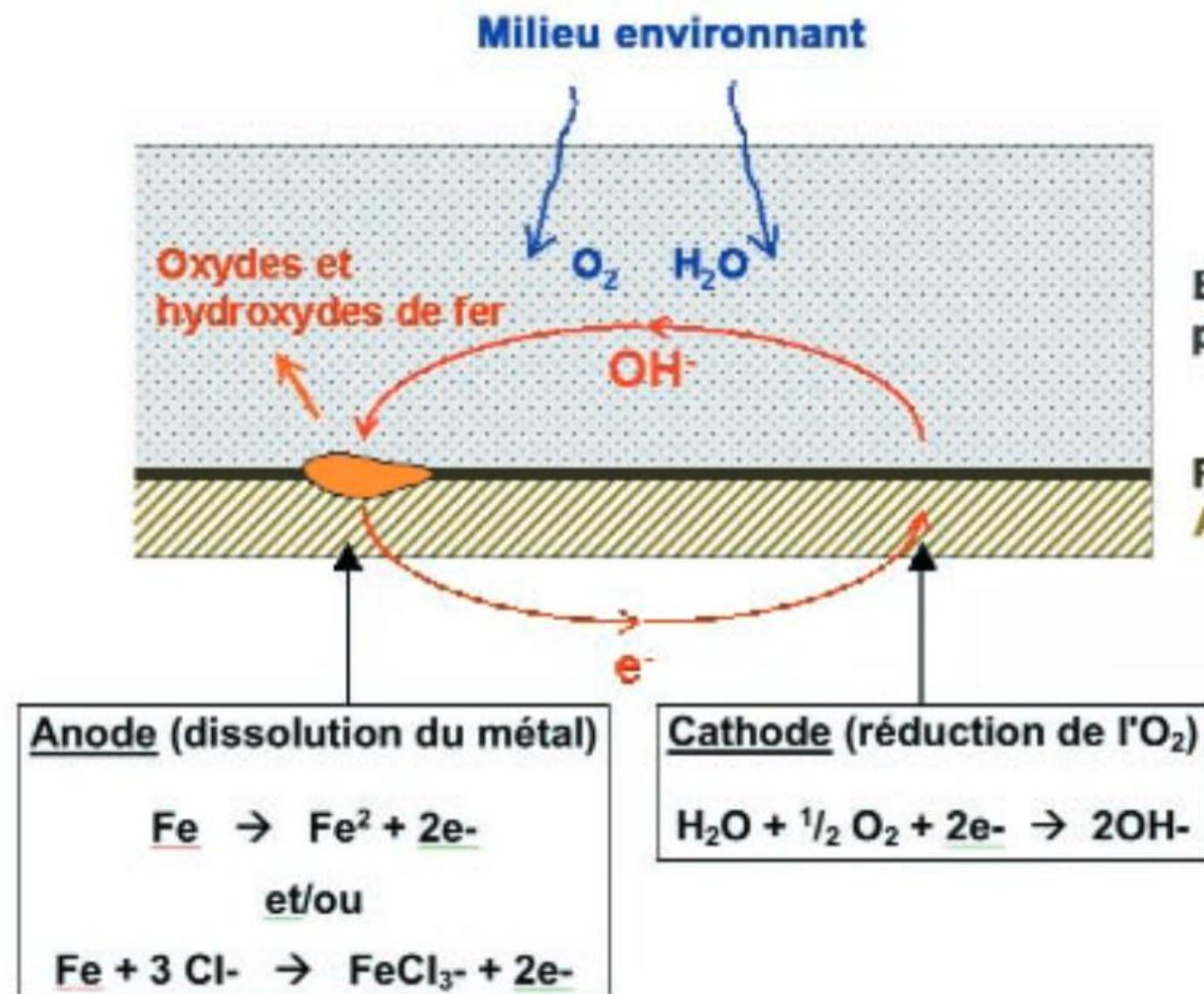
La microstructure d'un béton est constituée de pores de tailles différentes qui sont plus ou moins connectés



Les pores sont remplis de solution interstitielle ou d'air : ces pores peuvent sécher, transporter des espèces, des ions, des gaz etc.

Corrosion des armatures

Mécanisme chimique d'attaque de l'armature en acier



Paramètres importants

- Épaisseur de l'enrobage : les processus de diffusion (CO₂, chlorures, acides) sont en racine du temps → influence majeure de l'épaisseur de la couche à traverser
- Porosité (et tous les facteurs qui jouent sur la porosité : e/c, type de liant, ...)
- Disponibilité d'oxygène pour la réaction cathodique (cet oxygène est dissout dans la solution interstitielle)

A la profondeur des armatures :

Si $[\text{Cl}^-] > [\text{Cl}^-]_{\text{critique}}$ → initiation de la corrosion

$[\text{Cl}^-]_{\text{critique}} = 0,4 \%$ de la masse de ciment

→ piqûres de corrosion

<http://doc.lerm.fr/wp-content/uploads/2013/08/corrosion-armatures-carte.pdf>

Corrosion des armatures

Conséquences



Augmentation du volume des aciers corrodés
Contraintes exercées sur la matrice cimentaire

→ Affaiblissement de l'interface acier/béton

→ Diminution de la section de renforcement



Mise à nu des armatures par éclatement du béton

<http://doc.lerm.fr/wp-content/uploads/2013/08/corrosion-armatures-carde.pdf>

Corrosion des armatures

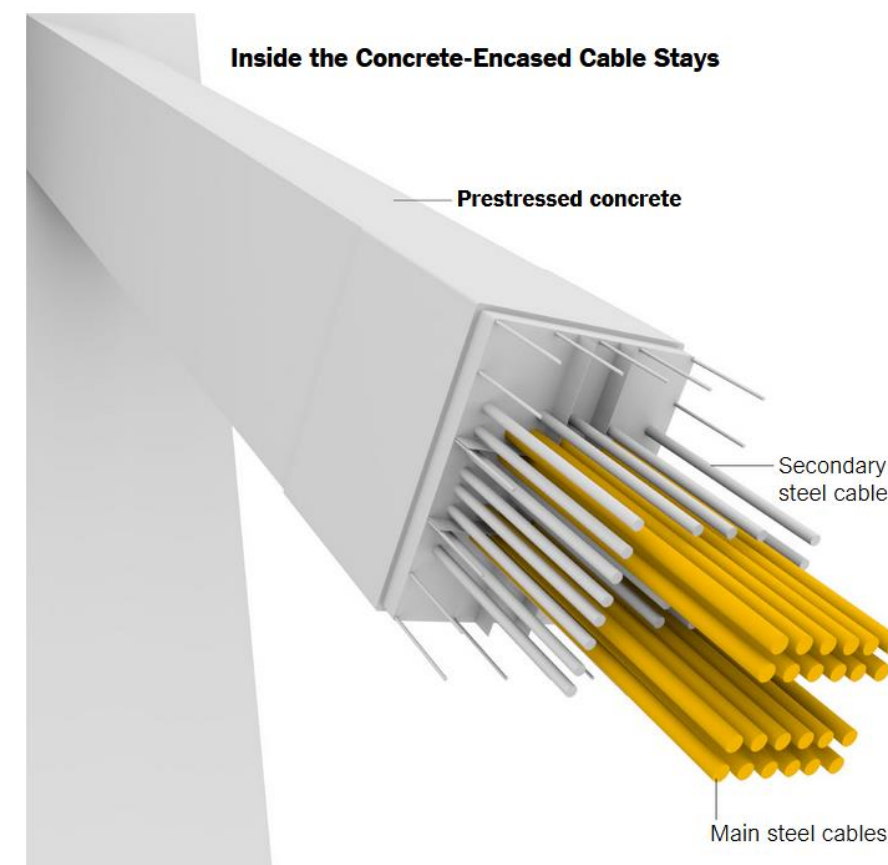
Exemple du pont Morandi

-



Effondrement du Pont Morandi, Gènes, Aout 2018 ayant causé 43 morts et 16 blessés

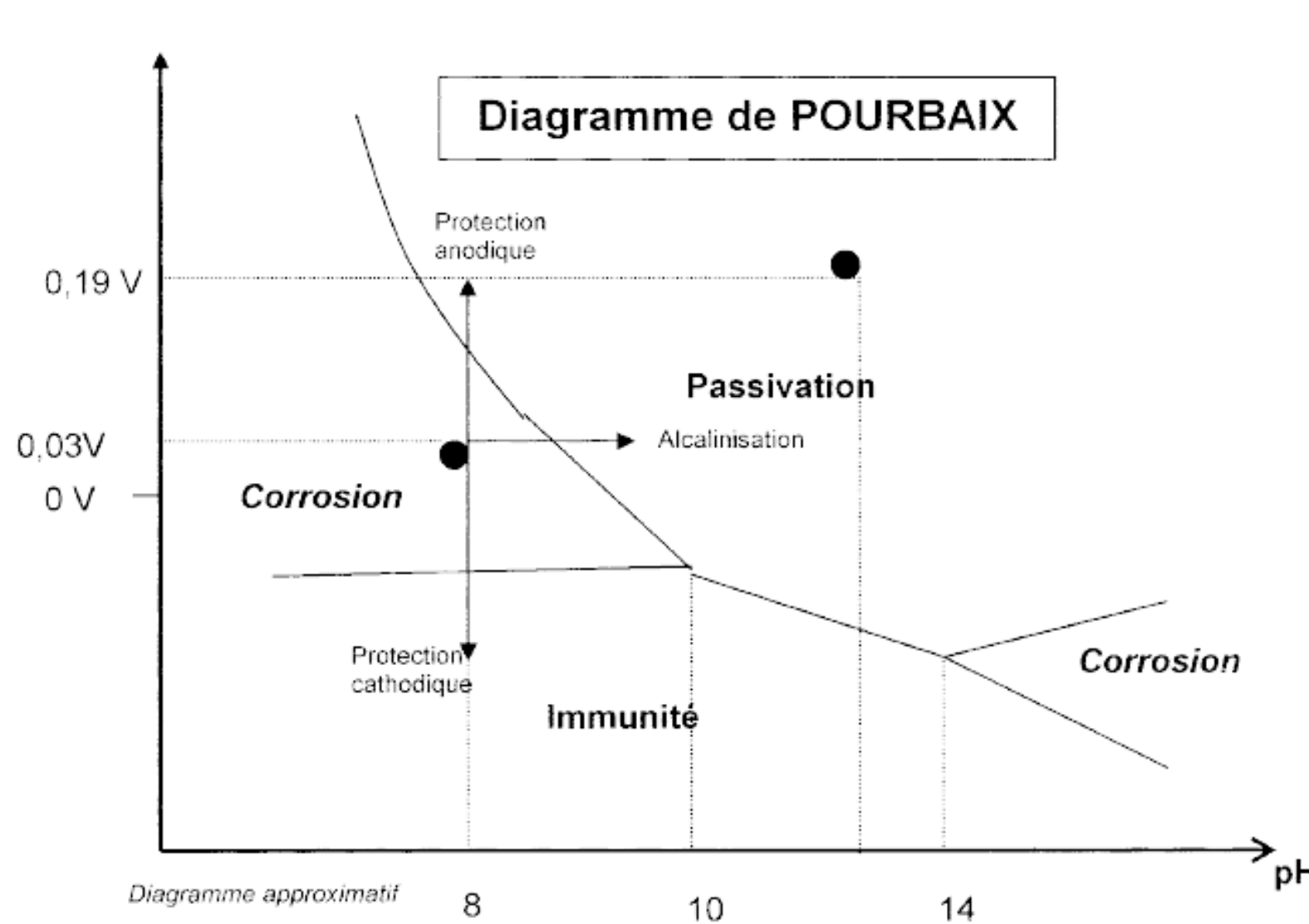
Une des explications pour la chute du pont repose sur la corrosion des aciers dans les suspentes en béton précontraint du pont qui aurait entraîné la rupture de la suspente, suivi de celle du tablier et de la pile du pont. Contrairement aux ponts classiques, les câbles en acier n'étaient pas à l'air libre et la corrosion n'était pas visible.



<https://www.nytimes.com/interactive/2018/09/06/world/europe/genoa-italy-bridge.html?mtrref=undefined&gwh=DB0FF5F7F04C7BD1D12D2113CFCCA58E&gwt=pay&assetType=PAYWALL>

Corrosion des armatures

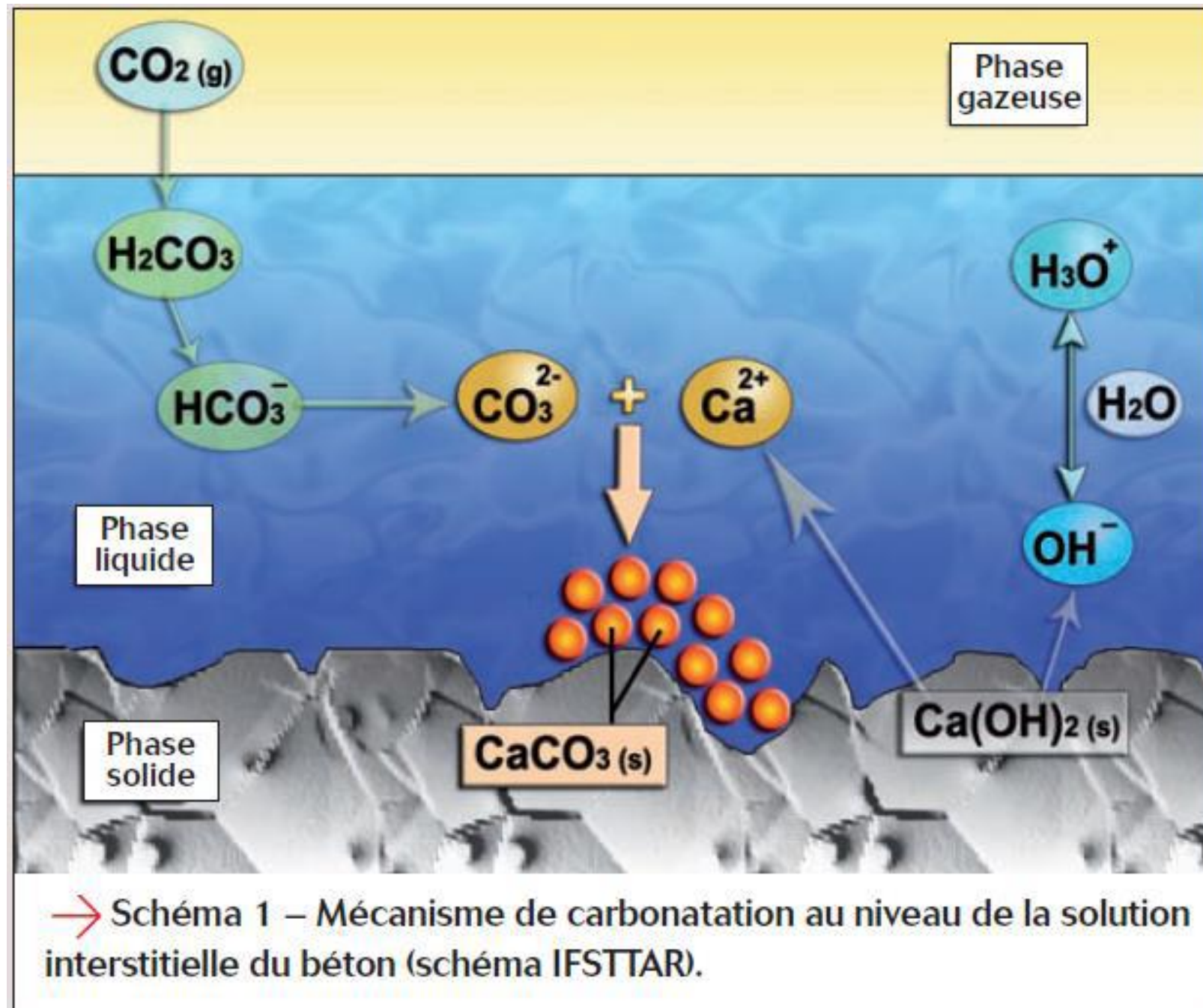
Effet de l'enrobage de béton



Le pH du béton (~13) entraîne la passivation des armatures : ce pH est principalement dû à la présence de Portlandite dans le béton

Carbonatation des bétons

Mécanisme



1ère phase : diffusion du gaz carbonique dans la texture du béton

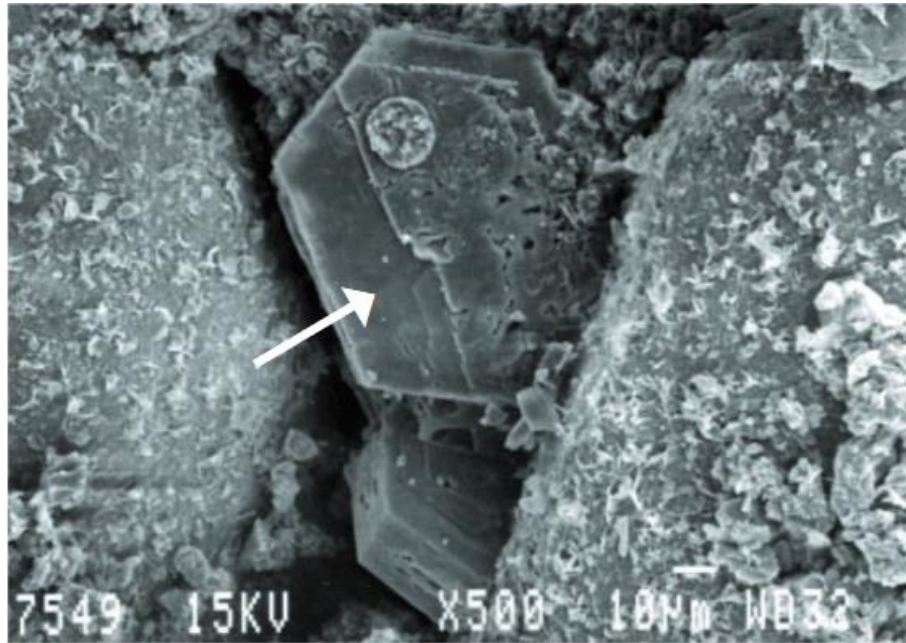
2ème phase : réaction de l'anhydride carbonique avec l'eau

3ème phase : réaction de l'acide carbonique formé avec la portlandite (hydrate)

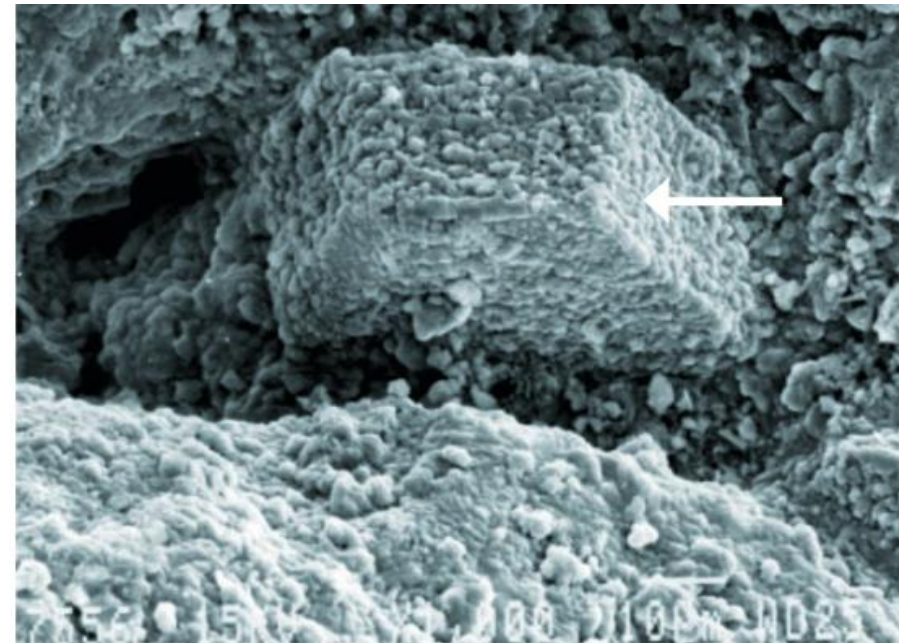
→ Formation de Carbonate de Calcium

Carbonatation des bétons

Conséquences



Crystal de portlandite
non carbonaté



Crystal de portlandite en cours de
carbonatation

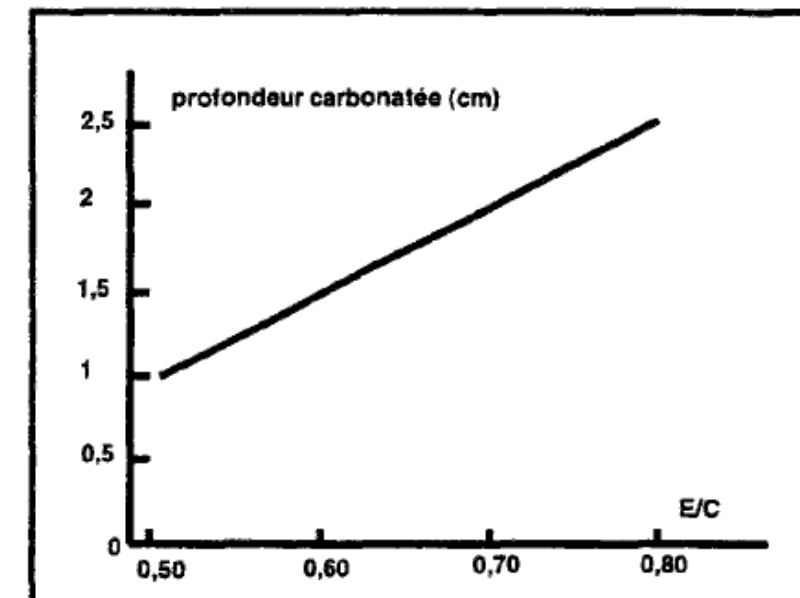
| Composé | Volume molaire (cm ³ /mol) | |
|---------------------|---------------------------------------|--------|
| Ca(OH) ₂ | 33,2 | ↓ >11% |
| CaCO ₃ | 36,9 | |
| C-S-H sain | 12 | ↓ >30% |
| C-S-H carbonaté | 16 | |

- La dissolution progressive de la portlandite provoque sa disparition, puis une diminution du pH dans le béton
- La profondeur de carbonatation augmente au cours du temps en racine du temps
- Diminution de la porosité et modification de la distribution des pores

Carbonatation des bétons

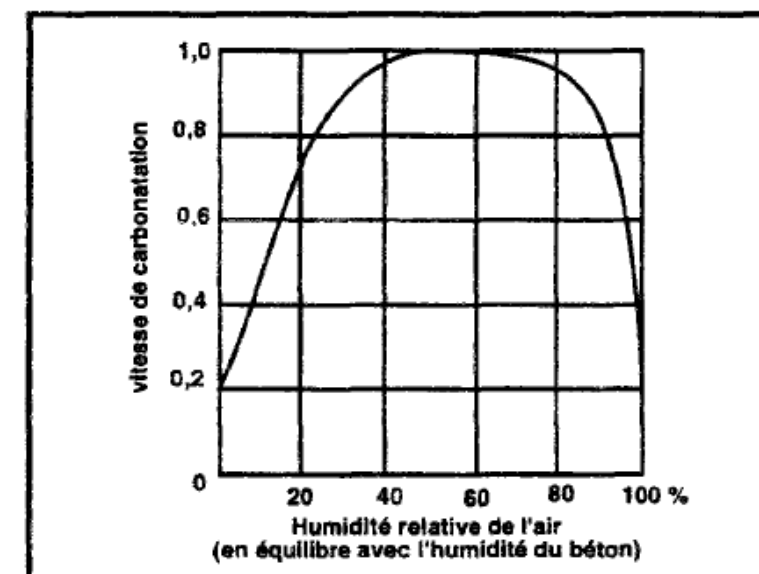
Paramètres influents

- Porosité du béton et rapport E/C
- → Impact sur la diffusion du CO_2
- Teneur en hydrates carbonatables
- → Plus il y a de portlandite, plus le CO_2 est consommé, plus la progression du front de carbonatation est ralentie
- Humidité relative
- → Carbonatation maximale entre 40 % HR et 60 % HR



Influence du rapport E/C sur la profondeur carbonatée au bout de trois ans, [124].

Houst 1984



Vitesse de carbonatation d'un béton en fonction de l'humidité relative (d'après VERBECK, [124]).

LERM - Carbonatation

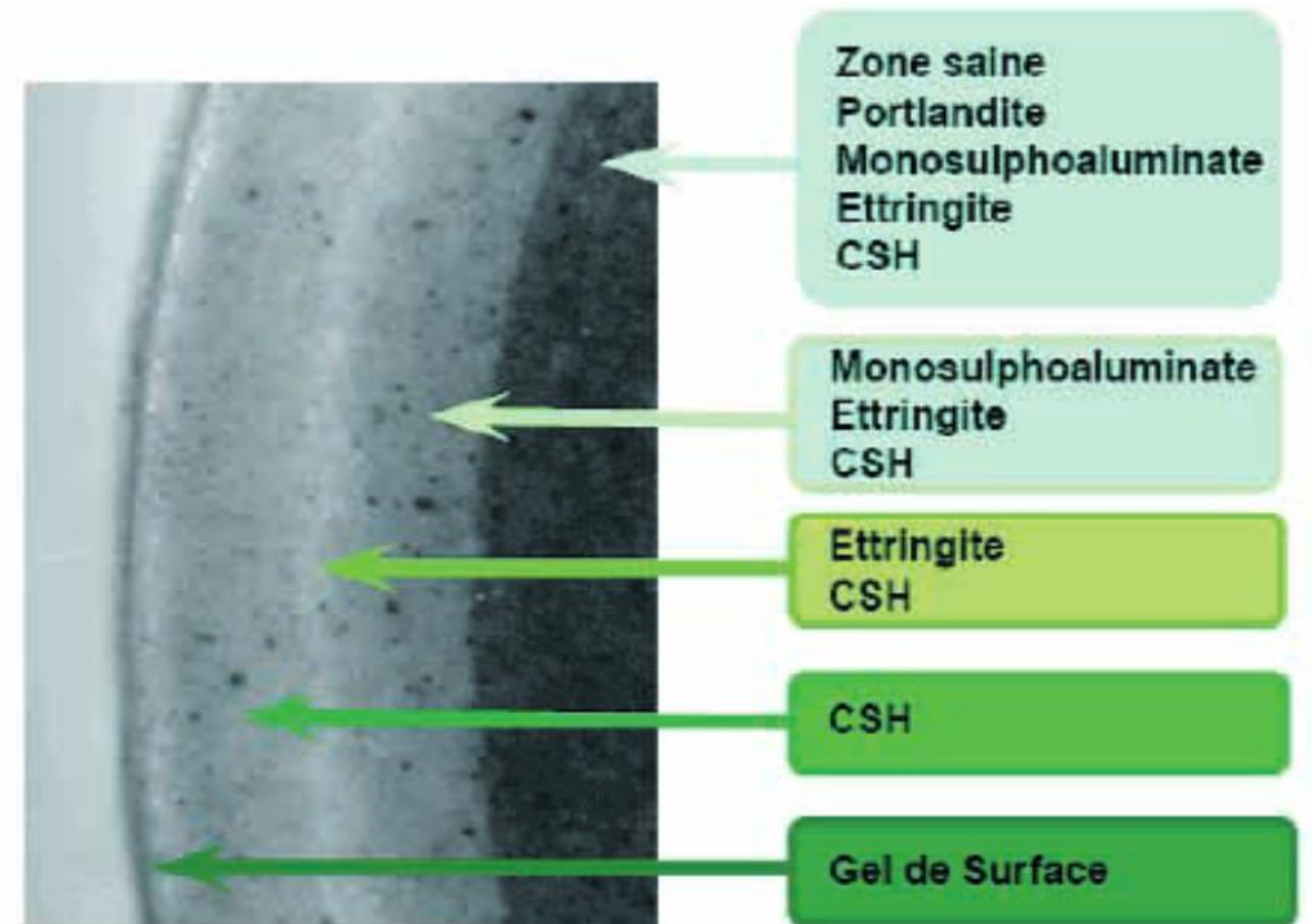
Lixiviation des bétons

Mécanisme

- Environnements chimiquement agressifs (eau, pure, eaux naturelles, eau de mer, acides, milieux biologiques)
- Dissolution prioritaire de la portlandite, puis d'autres hydrates → Plusieurs fronts de dissolution

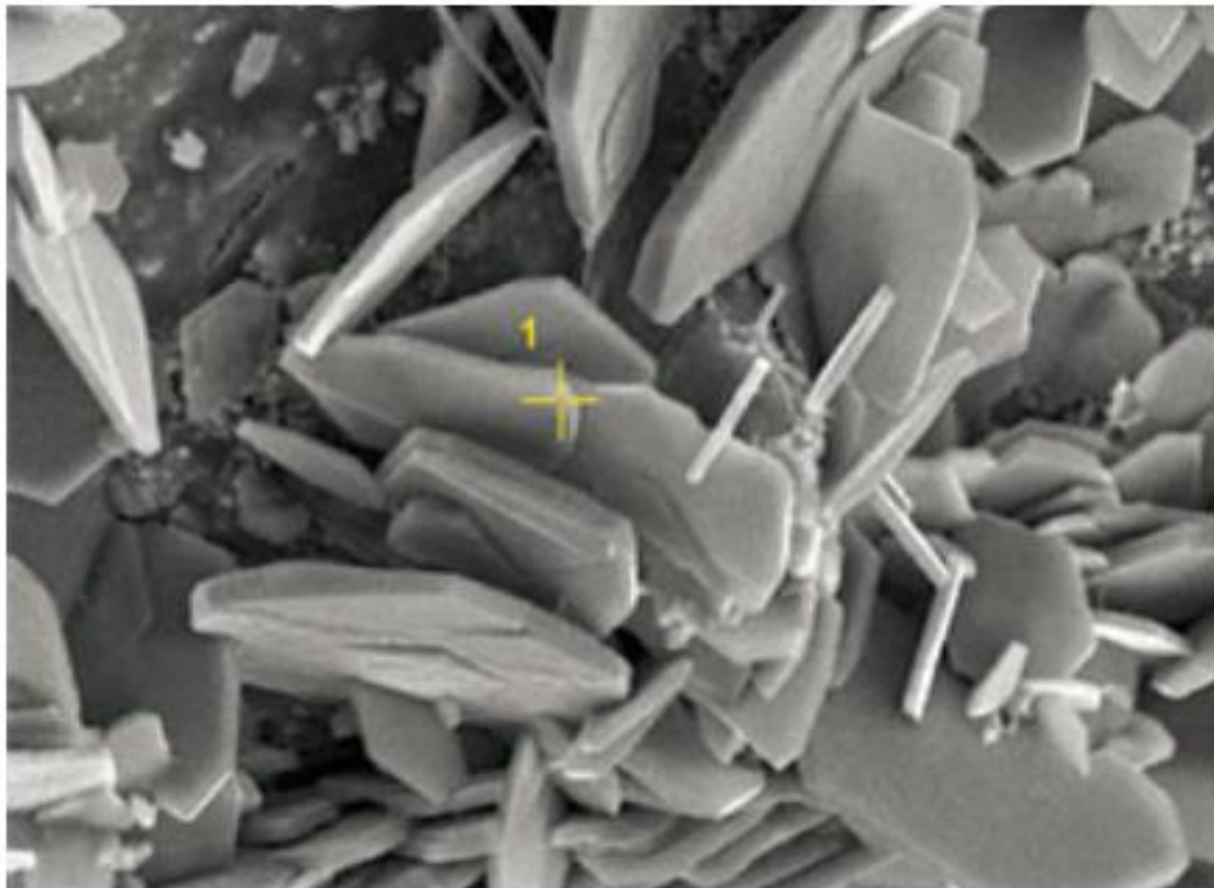
Conséquences

- Baisse du pH
- Perte de masse importante
- La partie lixiviée est vidée de son calcium
- La résistance mécanique diminue fortement
- Gonflement/ fissuration



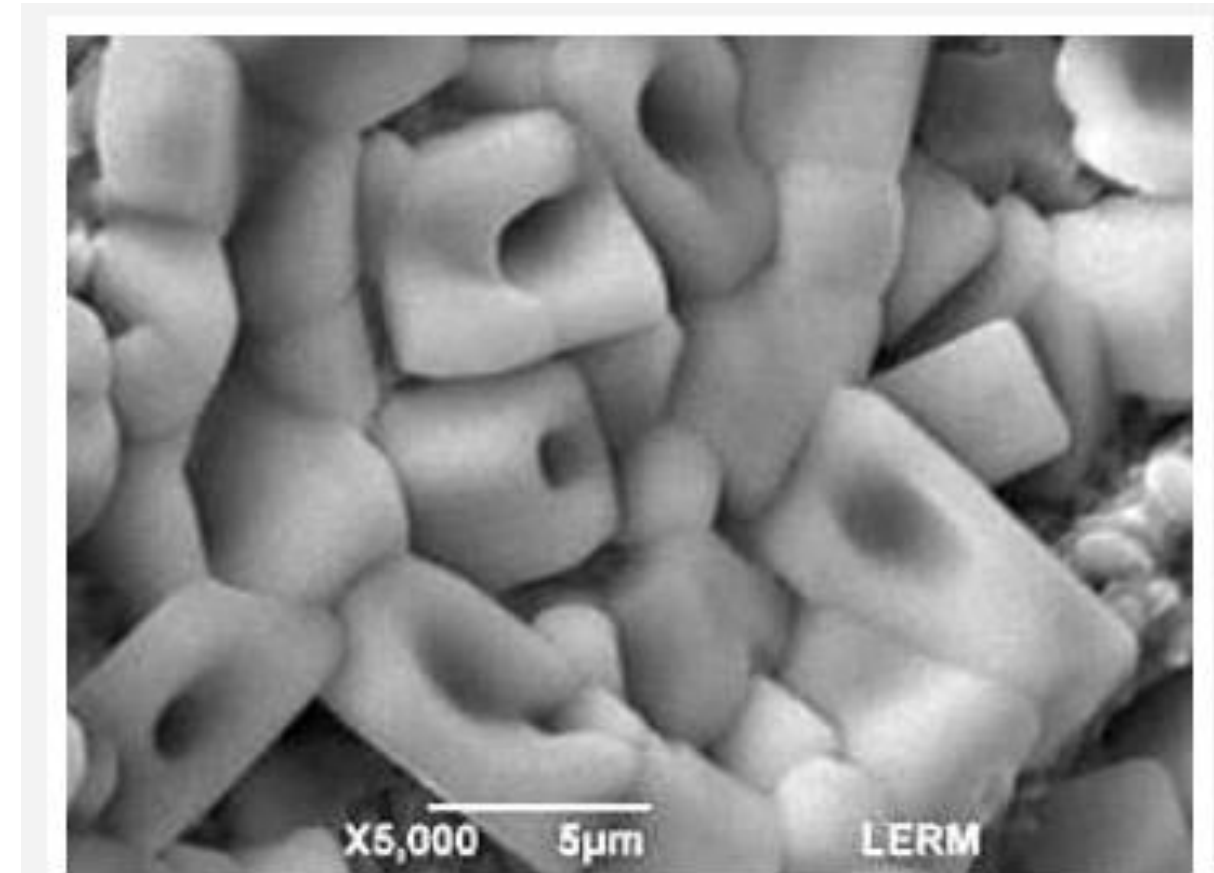
Pénétration des ions chlorures

Chlorures présents dans le béton



Chlorures « liés »

- Adsorption sur les C-S-H
- Nouveaux précipités: Réaction avec matrice cimentaire (anhydre C3A) pour former Chloroaluminate de calcium, sel de Friedel



Chlorures « libres » : sous forme ionique dans la solution interstitielle (NaCl)

Réaction des chlorures avec la portlandite

□ formation de chlorure de calcium



<http://doc.lerm.fr/les-chlorures-dans-le-beton/>

Pénétration des ions chlorures

Paramètres

Sources internes

Adjuvants chimiques
Granulats (NaCl)
Eau de gâchage

Sources externes

Eau de mer
Eau souterraine
Eau industrielle
Piscine
Sel de déverglaçage

En conditions immergées, les chlorures pénètrent par diffusion
En présence de cycle de séchage, les chlorures progressent avec l'eau, puis par diffusion dans la zone saturée

Paramètres

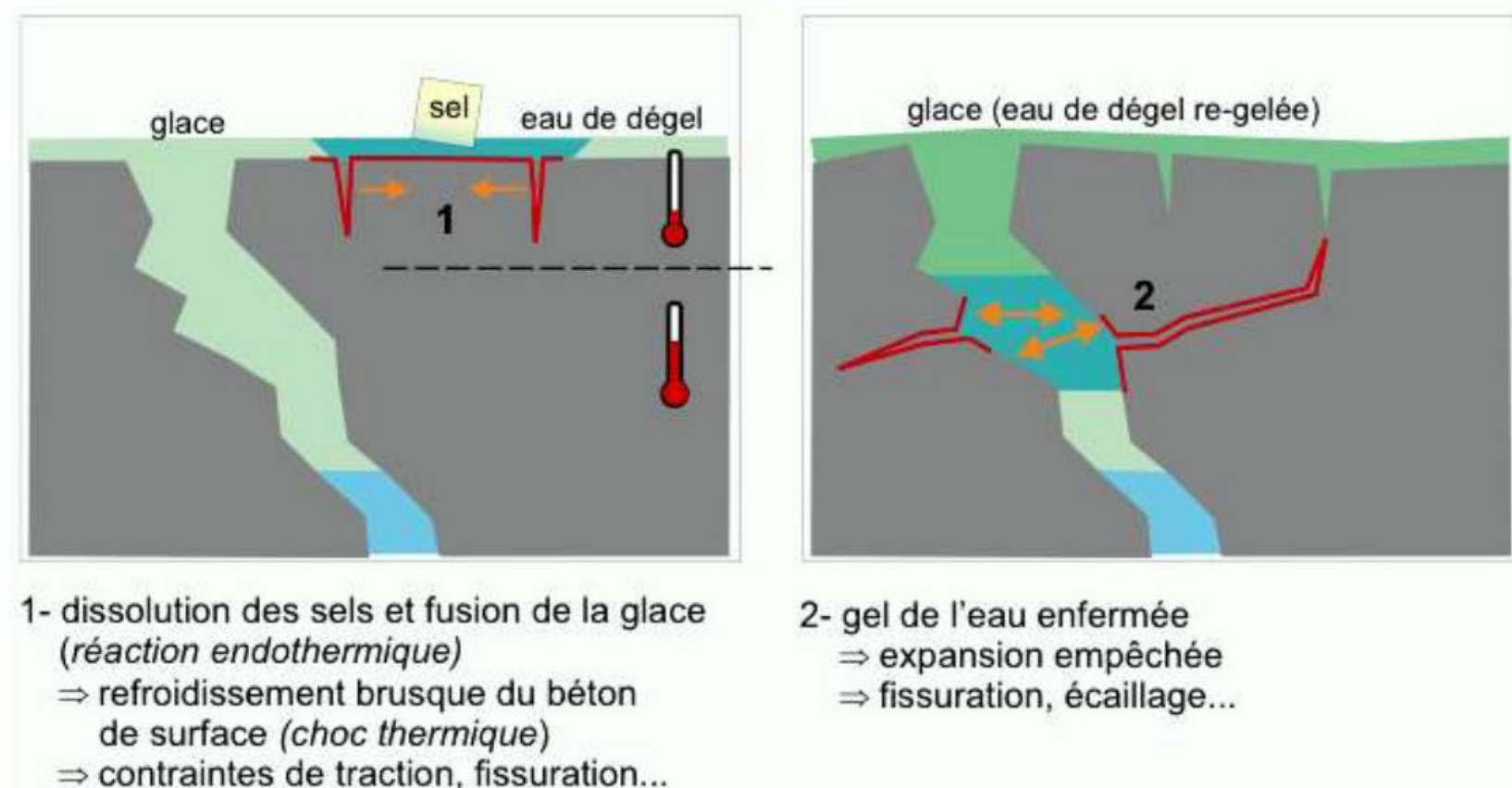
- La pénétration des chlorures est favorisée à fort e/c
- La cure du béton le protège de la pénétration des chlorures
- Les bétons à base de cendres volantes (CEM II et CEM V) et les bétons à base de laitiers (CEM III) sont plus résistants que les CEM I.



<http://doc.lerm.fr/attaque-de-la-matrice-cimentaire-par-les-chlorures/>

Gel/ dégel

- Eau contenue dans les plus gros pores peut geler
- Augmentation de volume de 9 % quand l'eau gèle
 - Pressions sur la matrice cimentaire
 - Modification de la surface des pores
 - Création de pressions osmotiques dues aux différentes concentrations des sels dans l'eau



Effet des sels de deverglaçage

LERM – Effet du gel/dégel sur les bétons



Écaillage du béton sous l'action combinée des cycles gel/dégel et des sels de déverglacage



Microfissuration ou fissuration dans la masse

Réaction sulfatique interne

Ettringite

Réaction normale d'hydratation :

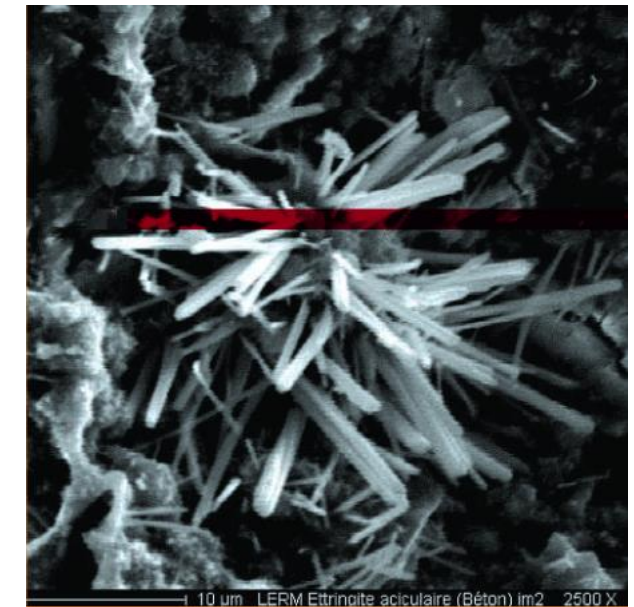
- Formation d'ettringite primaire dans les espaces libres du matériaux avant la prise du béton
- Formation d'ettringite secondaire qui cristallise dans le béton durci, à la faveur de circulation d'eau dans les espaces libres des bétons (phénomènes de dissolution/recristallisation)

Apport de sulfates extérieurs

- Apport par eaux sulfatiques (eaux de mer), sols (gypse), atmosphère, constituants internes du béton
- Formation d'ettringite secondaire pouvant entraîner des gonflements internes principalement attribués aux pressions de cristallisation.

Formation différée d'ettringite

- Si le béton a subi au jeune age une température supérieure à 65 °C, l'ettringite de formation primaire ne peut pas se former ou est décomposée
- Quand la température redescends, des cristaux d'ettringite peuvent se former dans le béton durci et provoquer des pressions de gonflement à l'origine des phénomènes d'expansion



*ettringite
primaire*

Réaction sulfatique interne

Conséquences



Gonflement et fissuration du béton
Phénomène de faïençage en surface

Variation du module d'Young

Paramètres

- Température de cure du béton
- Conditions de stockage
- Compositions du béton et du ciment (nature des granulats, proportion de granulats)
- Humidité

LERM - ettringite

Alcali-réactions

Attaque de la silice mal cristallisée des granulats par la solution interstitielle alcaline

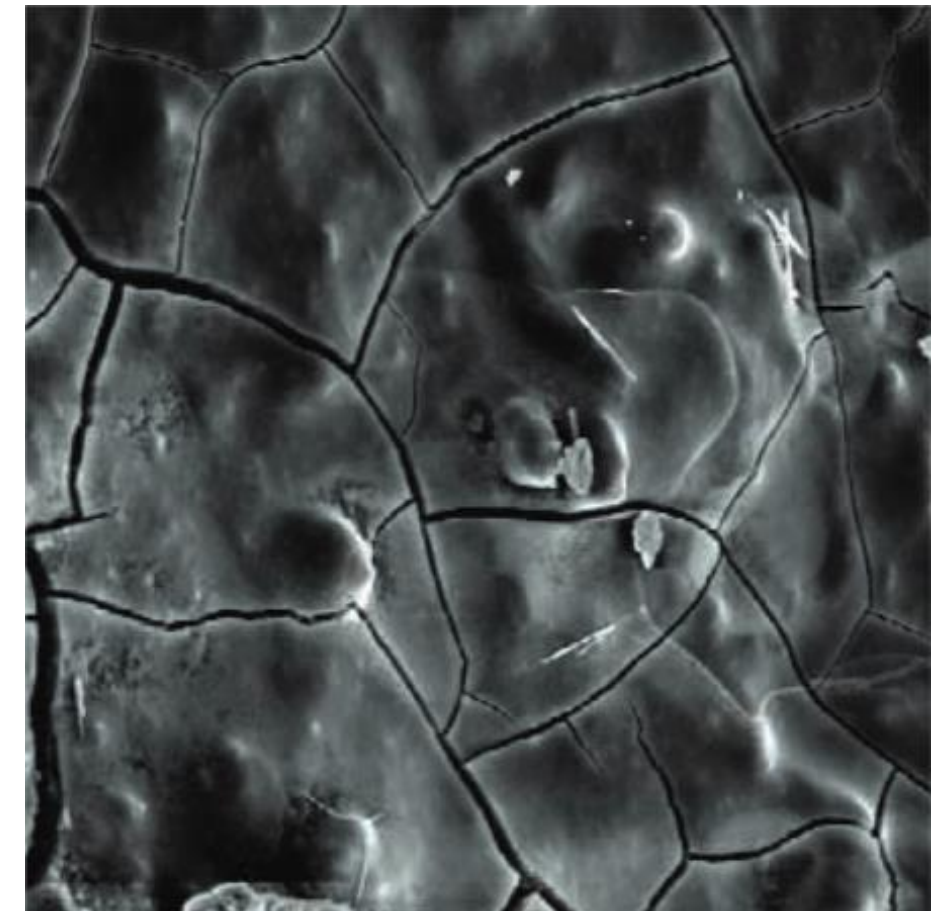
Les granulats sont classés en fonction de leur caractère réactif

Étapes

- La silice dissoute diffuse hors des granulats (si possible)
- La diminution du pH par consommation de OH^- favorise la dissolution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Production d'un gel calco-silico-alcalin (polymère inorganique) pouvant entraîner un gonflement et de la micro-fissuration



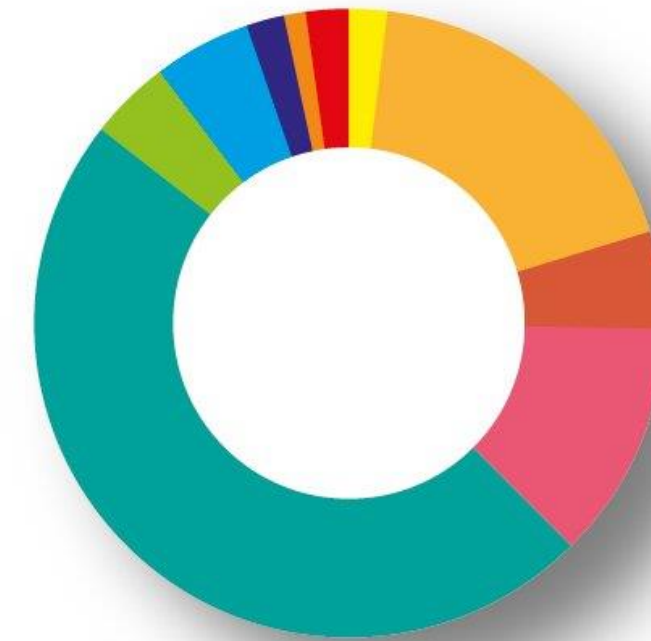
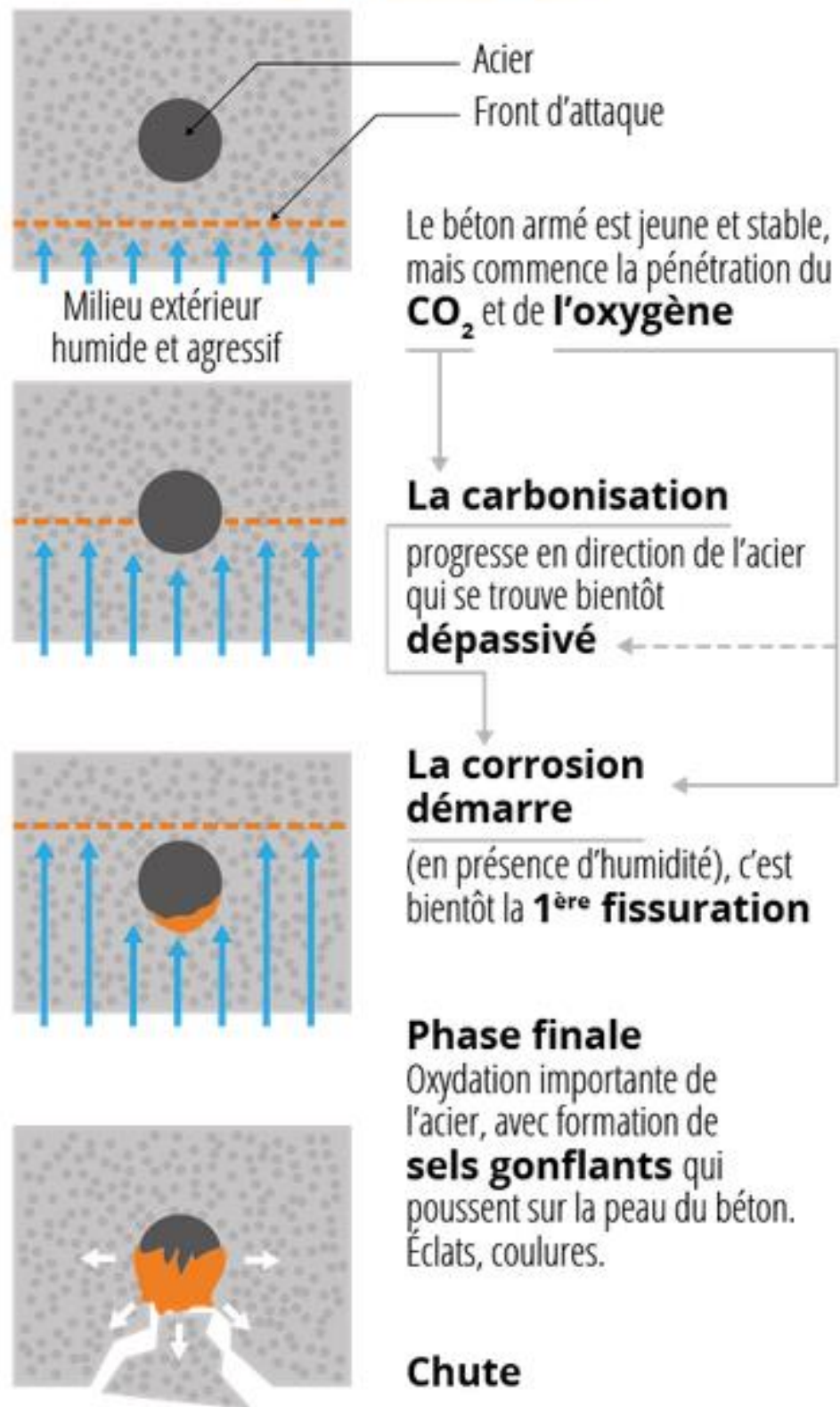
LERM – L'alcali réaction



Gel d'alcali réaction (x500)



Bilan

LES PHASES DE DÉGRADATION
DU BÉTON ARMÉ

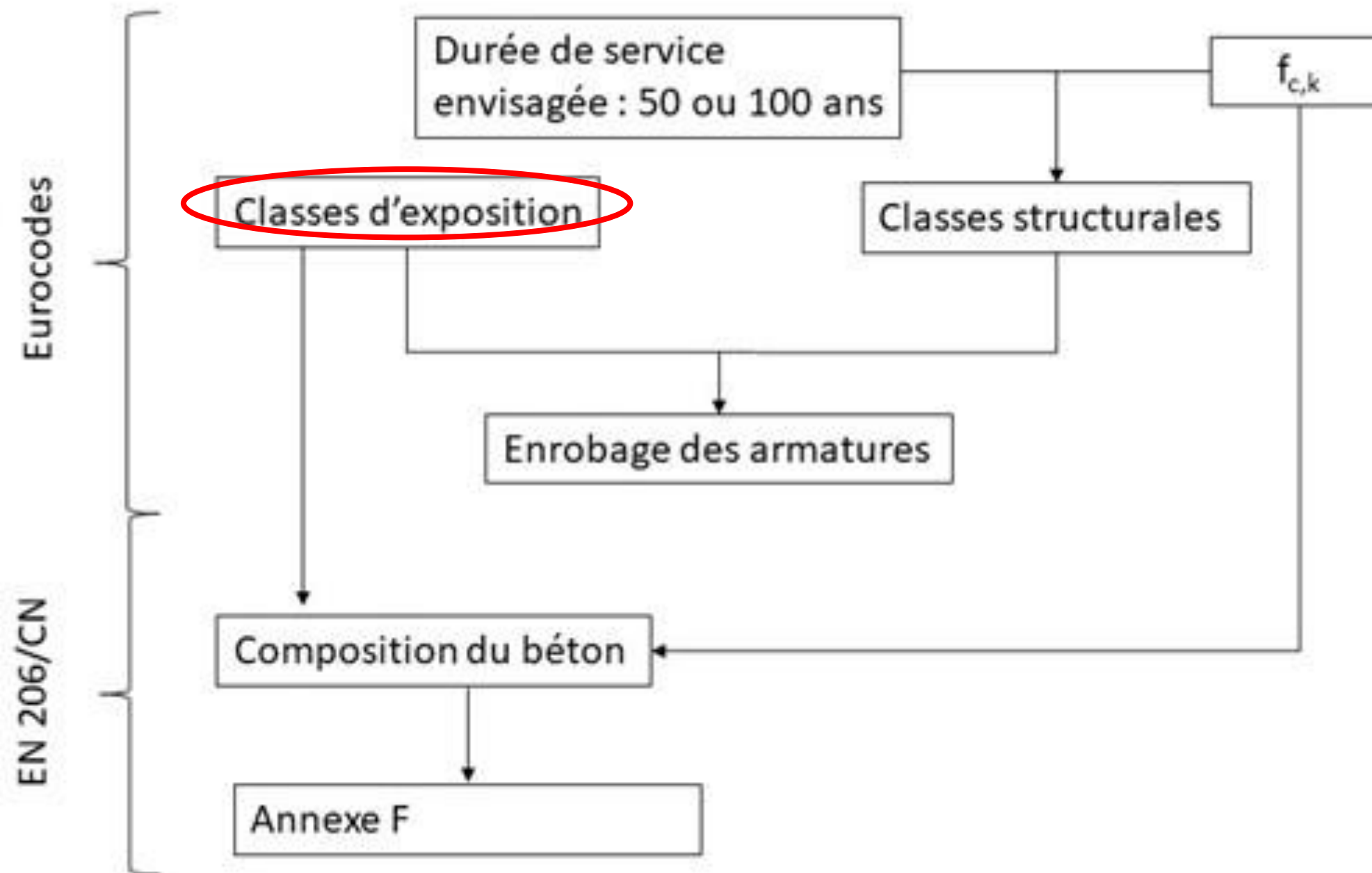
| | |
|------------------------|-----------------------|
| ■ Mécanique 18 % | ■ Alcali-réaction 5 % |
| ■ Matériaux 5 % | ■ Gel 2 % |
| ■ Fondations 12 % | ■ Érosion 1 % |
| ■ Corrosion 47 % | ■ Conception 4 % |
| ■ Attaque chimique 4 % | ■ Lixiviation 2 % |

Infosciment – les facteurs de dégradation du béton en %

Normes et approche performantielle

Approche prescriptive

Prise en compte de la durabilité dans les normes



Textes de référence :

Eurocode 0

Eurocode 2

Norme NF EN 206

Norme NF EN 206/CN

Fascicule 65 du CCTG

Fascicule FD P 18-480

normalisation
française

ISSN 0335-3931

FD P 18-480

Octobre 2022

Indice de classement : P 18-480

ICS : 91.100.30

Béton — Justification de la durabilité des ouvrages
en béton par méthode performantielleE : Concrete — Performance-based method for justifying concrete structures
durabilityD : Beton — Rechtfertigung der Nachhaltigkeit von Betonbauwerken durch
leistungsorientierte Methode

Fascicule de documentation

publié par AFNOR en octobre 2022.

**Octobre
2022 !**

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

Résumé

Le présent document définit la méthodologie de justification performantielle associée
à une formule de béton donnée. Les modifications par rapport à la composition ayant
été effectuées sont indiquées à l'exception de
celles concernant les adjuvants, relatives aux adaptations saisonnières, sous
réserve qu'elles aient été qualifiées.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : béton, formule chimique, composition,
durabilité, autorisation de fabrication, document technique, qualité, processus,
contrôle de qualité, performance, caractéristique, qualification, essai, grandeur,
laboratoire d'essais.

Approche prescriptive

Classes d'exposition

La norme NF EN-206 impose au **prescripteur de définir les actions environnementales** auxquelles le béton de l'ouvrage ou de chaque partie de l'ouvrage va être exposée pendant la durée d'utilisation

Approche traditionnelle basée sur la spécification **d'exigences de moyens:**

- Justification de la durabilité par respect des limites de composition des bétons
- Nature et dosage minimal en liant
- Rapport eau/liant maximal
- Classe de résistance minimal
- Teneur minimal en air dans les bétons

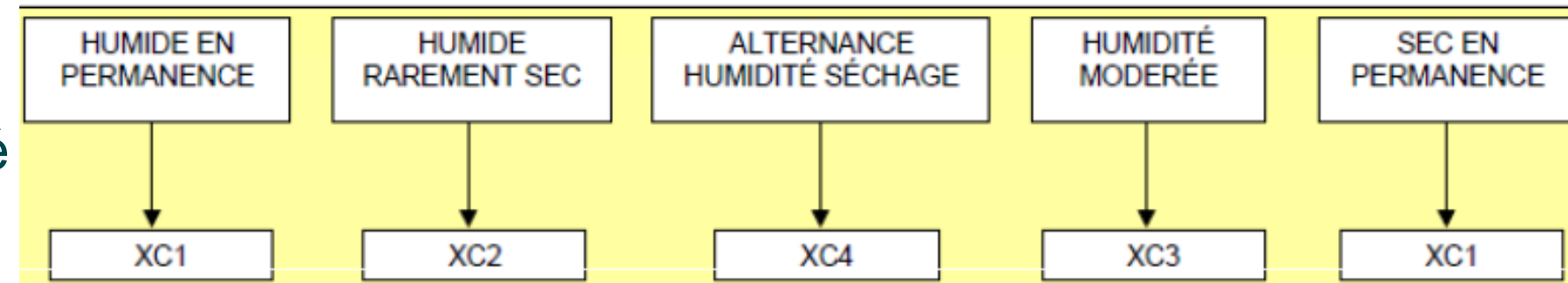
Pour chaque partie de l'ouvrage, il faut définir la **combinaison de classes d'exposition** qui s'y applique

Approche prescriptive

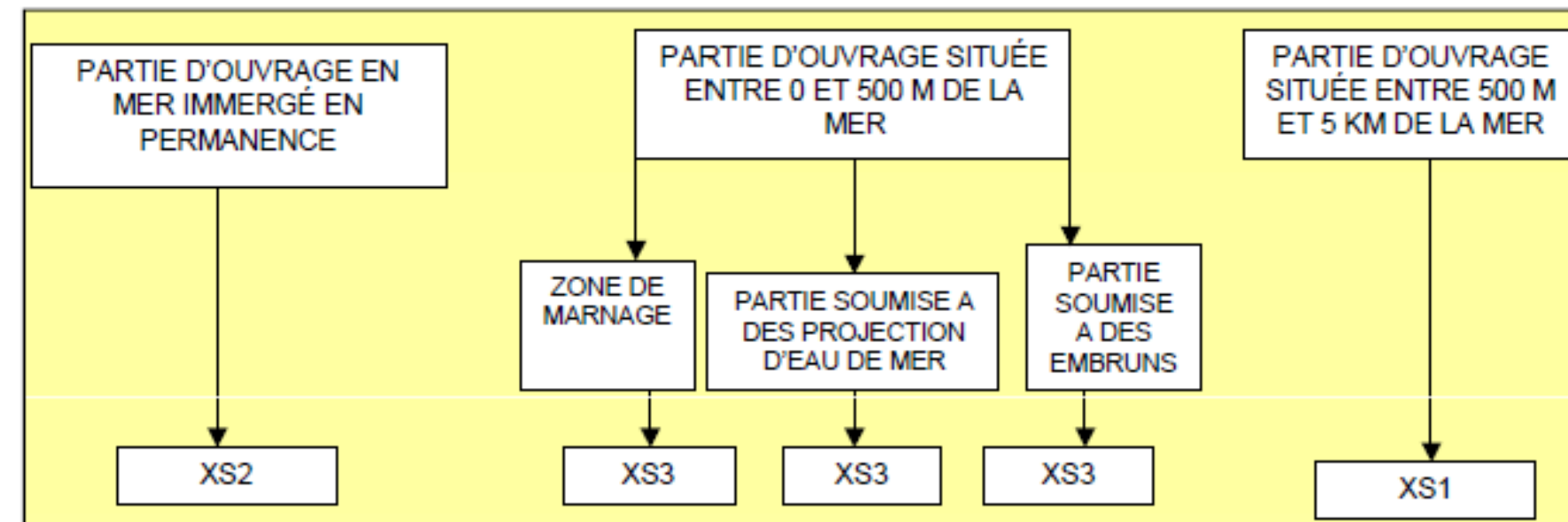
Classes d'exposition

Exposition à la carbonatation (XC)

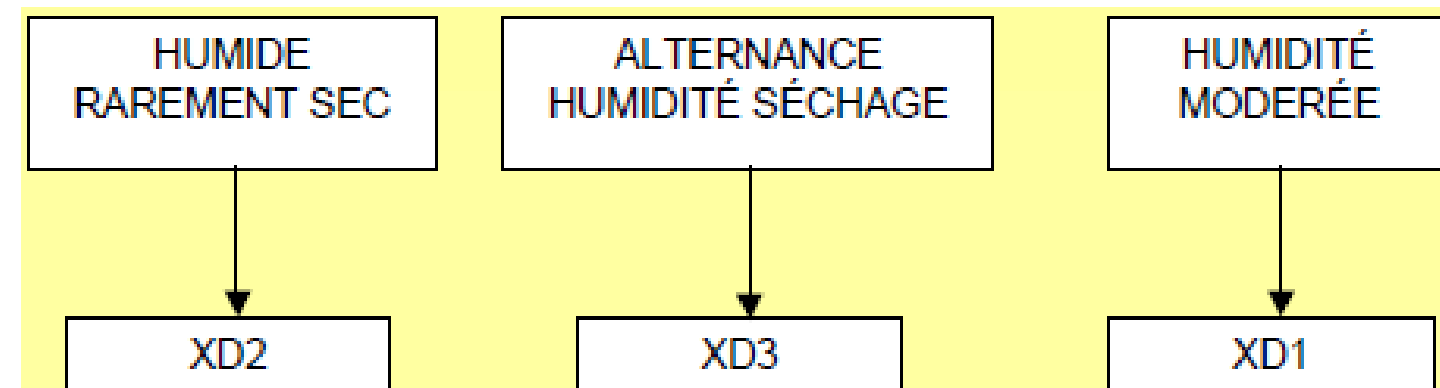
- Exposition du béton à l'air et à l'humidité
- Degré d'humidité
- Alternance humidité/séchage



Exposition aux chlorures présents dans l'eau de mer (XS)



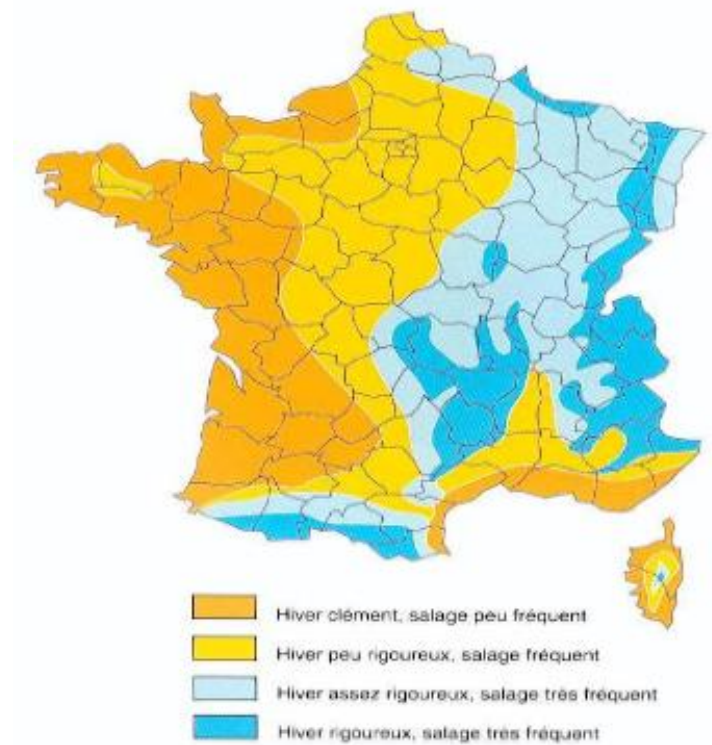
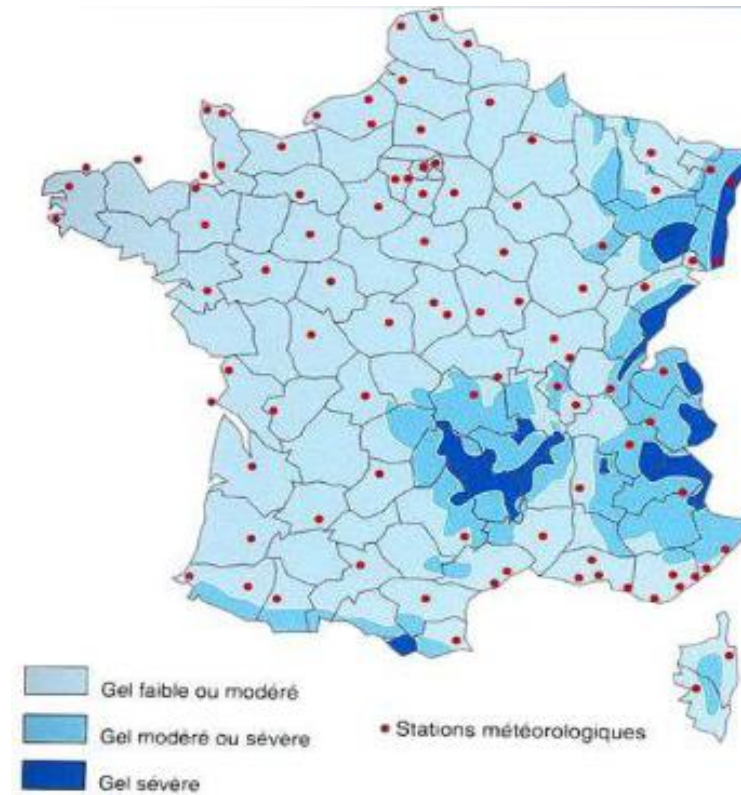
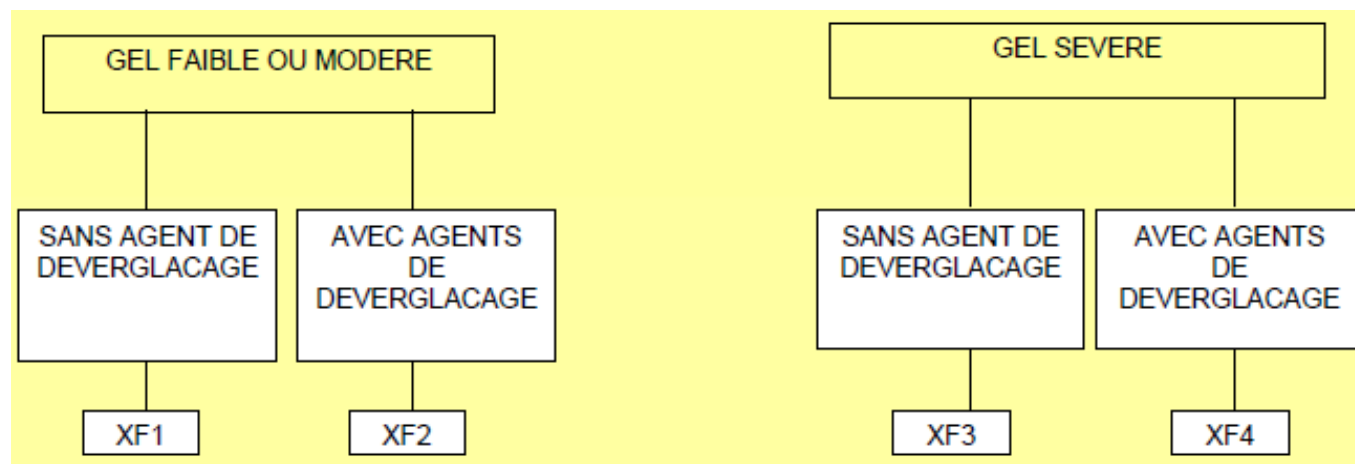
Exposition aux chlorures d'origine autre que marine (XD)



Approche prescriptive

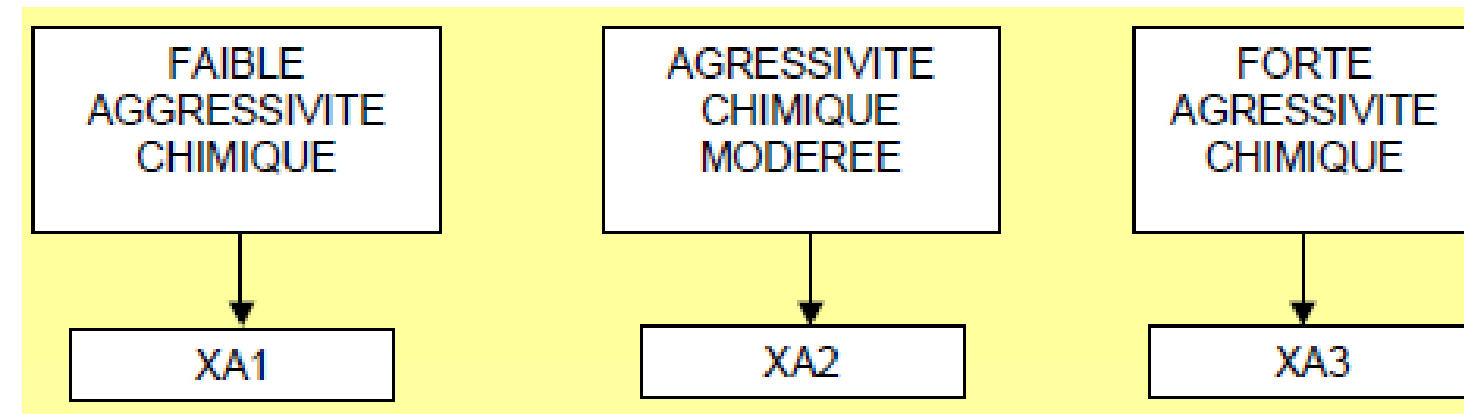
Classes d'exposition

Attaque gel/dégel (XF)



Attaques chimiques (XA)

→ attaques chimiques des sols naturels (SO₂⁻, acidité) et des eaux de surface ou souterraines (SO₄²⁻, pH, CO₂, NH₄⁺, Mg²⁺)



Approche prescriptive

Classes d'exposition

| EXEMPLES INDICATIFS DE CHOIX DE CLASSE D'EXPOSITION | | | | | | | | |
|--|-------------------|--------------------------------|--|------------|---------------|---------------------------------|--------------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| | VOILES INTÉRIEURS | DALLES ET PLANCHERS INTÉRIEURS | VOILES EXTÉRIEURS | BALCONS | PARKING FERMÉ | FONDACTIONS MURS ENTERRÉS PIEUX | VOIE D'ACCÈS | |
| XC | XC1 | XC1 | XC3 ou XC4 | XC3 ou XC4 | XC1 ou XC3 | XC2 | XC4 | |
| XF ⁽¹⁾ | / | / | XF1 ou XF3 | XF1 ou XF3 | / | XF1 | XF1 ou XF4 | |
| XD ⁽²⁾ | / | / | / | / | XD1 ou XD3 | / | XD1 ou XD3 | |
| XS ⁽³⁾ | / | / | XS1 ou XS3 | XS1 ou XS3 | / | / | XS1 ou XS3 | |
| XA | / | / | À analyser au cas par cas en fonction de l'agressivité des eaux souterraines et des sols (=> étude chimique) | | | | | |
| (1) En fonction de la zone de gel - (2) Si sel de déverglaçage - (3) Si exposition à l'air marin | | | | | | | | |

Approche prescriptive

Valeurs limites applicables en France

Le tableau NA.F.1 de l'annexe nationale de la norme EN 206/CN donne en fonction des classes d'exposition :

- Rapport maximal Eau/Liant
- Classe de résistance minimale
- Teneur minimale en liant équivalent
- Teneur minimale en air

Tableau NA.F.1 — Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition

| | X0 | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 | XS1 | XS2 | XS3 | XD1 | XD2 | XD3 | XF1 ^{a)} | XF2 ^{a)} | XF3 ^{a) b)} | XF4 ^{a) b)} | XA1 | XA2 | XA3 |
|--|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------|--------|--------|--------|
| Rapport $E_{eff}/liant$ éq maximal ^{c)} | – | 0,65 | 0,65 | 0,60 | 0,60 | 0,55 | 0,55 | 0,50 | 0,60 | 0,55 | 0,50 | 0,60 | 0,55 | 0,55 | 0,45 | 0,55 | 0,50 | 0,45 |
| Classe de résistance minimale | – | C20/25 | C20/25 | C25/30 | C25/30 | C30/37 | C30/37 | C35/45 | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C25/30 | C25/30 | C30/37 | C30/37 | C30/37 | C35/45 | C40/50 |
| Teneur mini en liant éq (kg/m ³) ^{d)} | 150 | 260 | 260 | 280 | 280 | 330 | 330 | 350 | 280 | 330 | 350 | 280 | 300 | 315 | 340 | 330 | 350 | 360 |
| Teneur minimale en air (%) | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 4 ^{e) k)} | 4 ^{e)} | 4 ^{e)} | – | – | – |

Application :

**Quel est le rapport Eau/liant maximal pour une voie d'accès de classe XC4/
XF1/XD1/XS1/XA1 ?**

Approche prescriptive

Prise en compte des additions cimentaires

Notion de liant équivalent (NF EN 206 – 5.2.5.2)

$$\text{Leq} = \text{Ciment} + k * \text{Addition}$$

→ Le terme Eau/Ciment est remplacé par Eau/Leq

→ La quantité Leq ne doit pas être inférieure à la teneur minimale en ciment

| Dénomination de l'addition | Valeur du coefficient k | Conditions supplémentaires à remplir par rapport aux exigences des normes de spécifications des additions considérées |
|--|---------------------------|---|
| Additions de type II | | |
| Cendres volantes pour béton | 0,60 | Si $i_{28} \geq 0,83$ et $i_{90} \geq 0,95$ |
| | 0,50 | Si $i_{28} \geq 0,80$ et $i_{90} \geq 0,90$ |
| | 0,40 | Sans objet |
| Fumées de silice | 2,00 | Si dans les expositions XA $E_{\text{eff}}/\text{Liant éq} \leq 0,45$ et $C \geq 295 \text{ kg/m}^3$ Si dans les expositions différentes de XA $E_{\text{eff}}/\text{Liant éq} \leq 0,45$ et $C \geq 280 \text{ kg/m}^3$ |
| | 1,00 | Dans les autres cas ou sur prescription particulière |
| Laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau | 0,90 | Si $i_7 \geq 0,65$ et $i_{28} \geq 0,85$ (classes A et B) |
| | 0,60 | Sans objet (classe C) |
| Métakaolins de type A | 1,00 | Sans objet |

Approche prescriptive

Prise en compte des additions cimentaires

Le tableau NA.F.1 donne le taux de substitution maximal du ciment $A/(C+A)$ en fonction des combinaisons des classes d'exposition

Tableau NA.F.1 — Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition

| | | X0 | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 | XS1 | XS2 | XS3 | XD1 | XD2 | XD3 | XF1 ^{a)} | XF2 ^{a)} | XF3 ^{a) b)} | XF4 ^{a) b)} | XA1 | XA2 | XA3 | | |
|--------------------------------------|--|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|----------------------------|------------------------------|---|--------------------|--------|--------|------|------|
| | Rapport $E_{eff}/liant$ éq maximal ^{c)} | – | 0,65 | 0,65 | 0,60 | 0,60 | 0,55 | 0,55 | 0,50 | 0,60 | 0,55 | 0,50 | 0,60 | 0,55 | 0,55 | 0,45 | 0,55 | 0,50 | 0,45 | | |
| | Classe de résistance minimale | – | C20/25 | C20/25 | C25/30 | C25/30 | C30/37 | C30/37 | C35/45 | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C25/30 | C25/30 | C30/37 | C30/37 | C30/37 | C35/45 | C40/50 | | |
| | Teneur mini en liant éq (kg/m ³) ^{d)} | 150 | 260 | 260 | 280 | 280 | 330 | 330 | 350 | 280 | 330 | 350 | 280 | 300 | 315 | 340 | 330 | 350 | 360 | | |
| | Teneur minimale en air (%) | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 4 ^{e) k)} | 4 ^{e)} | 4 ^{e)} | – | – | – | | |
| | Essai(s) de performances ^{m)} | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | NF P 18-425 et XP P 18-420 | NF P 18-425 (ou NF P 18-424) | NF P 18-425 (ou NF P 18-424) et XP P 18-420 | – | – | – | | |
| Combinaison CEM I + addition | Rapport maximal $A/(A+C)$ | Cendres volantes | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,15 ^{o)} | 0,30 | 0,30 | 0,30 | |
| | | Fumées de silice | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 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 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 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 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,15 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| | | Addition calcaire catégorie A | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,30 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,30 | 0,25 | 0,25 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | | Addition calcaire catégorie B | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,25 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Addition siliceuse de minéralogie QZ | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | |

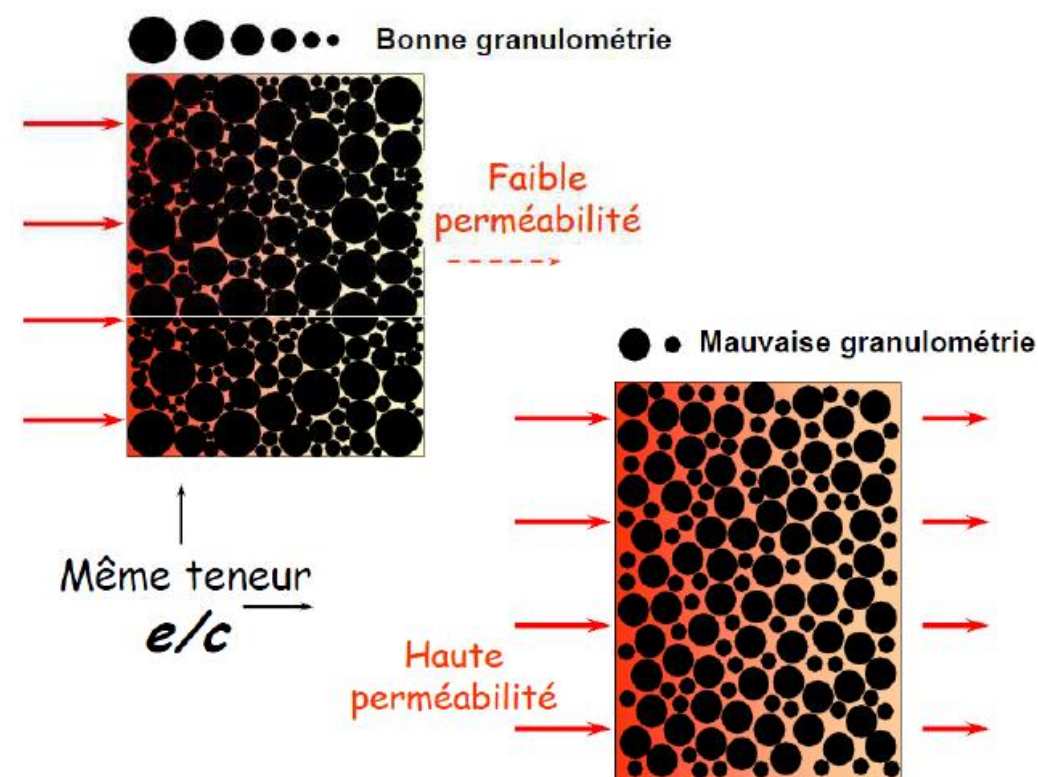
Application :

Quel est le taux de substitution maximale avec des cendres volantes pour une voie d'accès de classe XC4/ XF1/XD1/XS1/XA1 ?

Approche prescriptive

Limites

- Peu de possibilités d'innovations et de prise en compte du développement durable
 - Mal adapté aux ouvrages exceptionnels
 - Mal adaptée si la durée de vie est supérieure à 50 ans
 - Faible possibilité de valorisation des ressources locales
 - Quantités d'additions limitées
-
- Ne prend pas en compte la qualité de l'empilement granulaire



Approche performantielle

Principe et objectifs

- Fascicule FD P 18-480 : « appréhender la durabilité des bétons en considérant non pas les seules données liées à la formulation, mais, au moins pour la résistance à certaines agressions, certaines caractéristiques ou propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci, et des armatures qu'il enrobe, lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données. »
- Démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé, basée sur :
 - la notion d'indicateurs de durabilité
 - une démarche scientifique (modèles calibrés des différentes dégradations prises en compte)
 - si possible, des formules locales de béton pré-qualifiées (pour éviter des dérives en matière d'économie et de délais)
- Meilleure prise en compte du contexte local de l'ouvrage: utilisation des matériaux locaux
meilleure adaptation des formules de béton aux conditions environnementales
- Meilleure maîtrise de la « durée de vie »
- Meilleure adaptation aux exigences du développement durable

Approche performantielle

Norme NF EN 206

Approche prescriptive

Obligations de moyens

Valeurs limites pour
la composition du béton

Concept de coefficient k
de prise en compte des additions

Approche performantielle

Obligations de résultats :
*Permet de déroger aux règles sur le rapport Eau/Liant, la
nature du liant et la qualité des granulats*

Approche comparative

Approche absolue

Approche performantielle comparative

Guides

NF EN 206+A2

MARS 2021

www.afnor.org

Ce document est à usage exclusif et non collectif des clients AFNOR. Toute mise en réseau, reproduction et redistribution, sous quelque forme que ce soit, même partielle, sont strictement interdites.

This document is intended for the exclusive and non collective use of AFNOR customers. All network exploitation, reproduction and re-dissemination, even partial, whatever the form (hardcopy or other media), is strictly prohibited.

AFNOR
Pour : ENS PARIS-SACLAY
Identité : ENS PARIS-SACLAY
Code siret : 19940607500036
Client : 4512600
Le : 28/09/2021 à 16:31

Diffusé avec l'autorisation de l'éditeur
Distributed under licence of the publisher

 DOCUMENT PROTÉGÉ
PAR LE DROIT D'AUTEUR

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans accord formel.

Contact :
AFNOR - Norm Info
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél : 01 41 62 76 44
Fax : 01 49 17 92 02
E-mail : norminfo@afnor.org

afnor



**Cahier des clauses techniques générales
applicables aux marchés publics
de travaux de génie civil**

Fascicule N°65

**EXECUTION DES OUVRAGES DE GENIE CIVIL
EN BETON**

Version 1.0 - Décembre 2017

Fascicule 65

1/171



Approche performantielle comparative

Norme NF EN 206

5.2.5.3 Principes du concept de performance équivalente du béton

(1) Les principes du « concept de performance équivalente du béton » permettent de modifier les exigences relatives à la teneur minimale en ciment et au rapport maximal eau/ciment dans les cas où une ou plusieurs additions spécifiques sont utilisées avec un ou plusieurs ciments spécifiques, pour lesquels l'origine et les caractéristiques de chacun sont clairement définies et documentées.

(2) Conformément aux exigences de 5.2.5.1, l'équivalence de performance du béton avec celle d'un béton de référence conforme aux exigences de la classe d'exposition appropriée (voir 5.3.2) doit être prouvée, en particulier pour ce qui concerne son comportement vis-à-vis des actions dues à l'environnement.

(3) Le concept doit uniquement être utilisé pour des ciments conformes à l'EN 197-1 avec une ou plusieurs additions.

NOTE 1 Les dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation peuvent imposer des restrictions vis-à-vis des types de ciment et des catégories de perte au feu des cendres volantes, afin d'adapter la composition aux ciments actuellement autorisés.

NOTE 2 Le CEN/TR 16639 fournit des informations plus détaillées sur ce concept.

Approche performantielle comparative

Guide du FNTP/FFB/CERIB/FIB

Objectif

Montrer que le béton à qualifier présente une performance de durabilité au moins équivalente à un béton de référence respectant la norme NF EN 206/CN + les conditions décrites dans le guide

Béton de référence

- Constituants et méthodes d'essais en accord avec la norme NF EN 206-1
- Bétons sans additions, avec les même granulats que béton à qualifier
- Exigences durcies par rapport à la norme :
 - dosage en ciment supérieur de 5 % au dosage minimal
 - rapport eau/ciment maximal est diminué de 0,05%
 - classe de résistance supérieure d'une classe à la classe minimale

Critères de performances

Les critères performantiels donnés remplacent ceux de la norme NF EN 206 pour garantir la durabilité de l'ouvrage

Approche performantielle comparative

Fascicule 65 du CCTG

Garde fous :

Le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{iant}}$ équivalent ne doit pas dépasser la limite du tableau de plus de 0,10

La teneur en liant équivalent doit être au moins égale à 80% de celle imposée par le tableau de la norme NF EN 206

Le rapport maximal $A/(A+C)$ doit rester inférieur aux limites suivantes en fonction de la nature du ciment de base

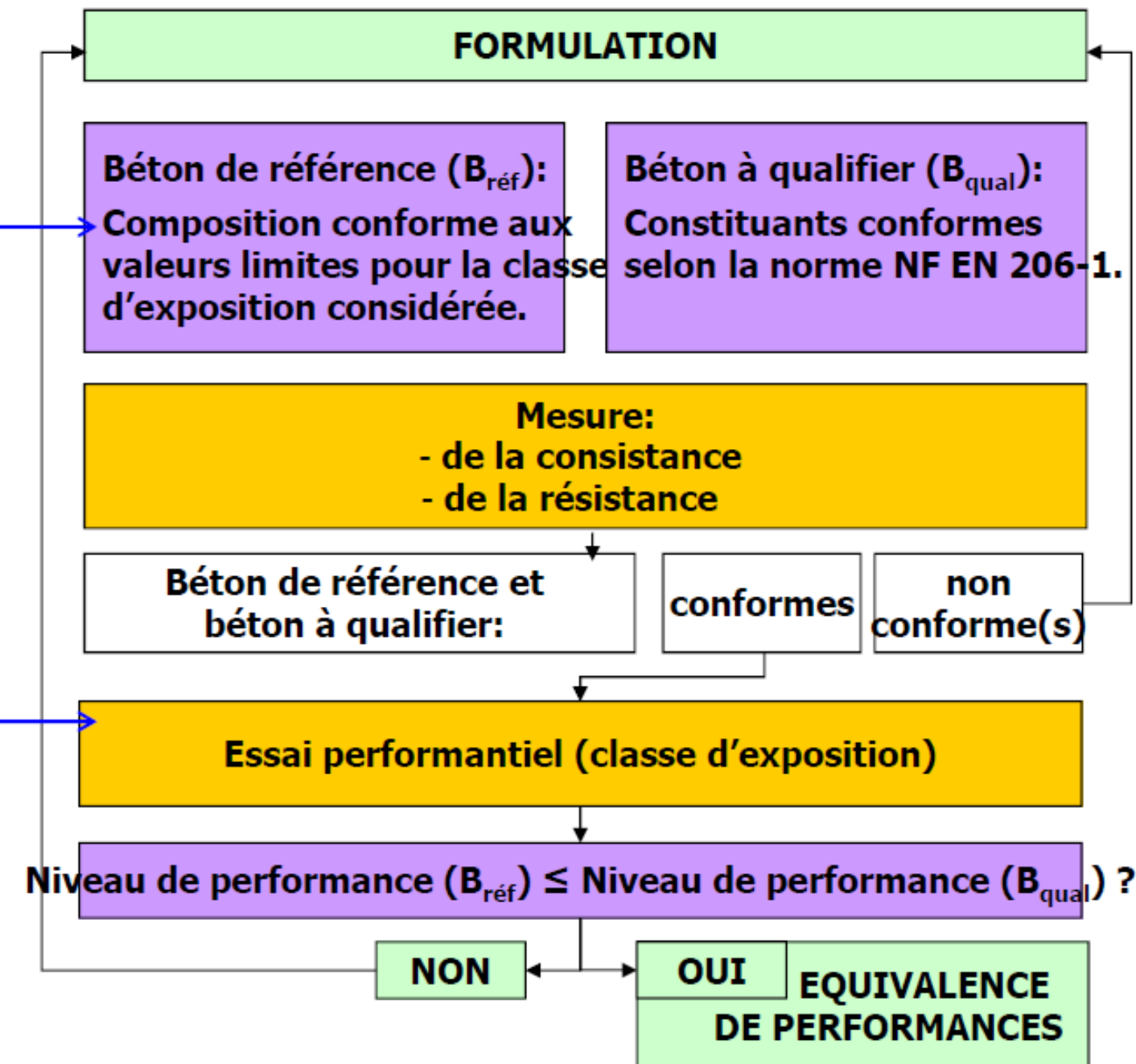
Approche performantielle comparative

Guide du FNTP/FFB/CERIB/FIB

A justifier :

Définition du béton de référence ?

Choix de l'essai performantiel et de l'indicateur associé ?



Approche performantielle absolue

Guides



Groupe de travail

"Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Indicateurs de durabilité"

Documents scientifiques et techniques

CONCEPTION DES BÉTONS POUR UNE DURÉE DE VIE DONNÉE DES OUVRAGES
Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction

Etat de l'art
et

Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité



Ju

Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux de génie civil

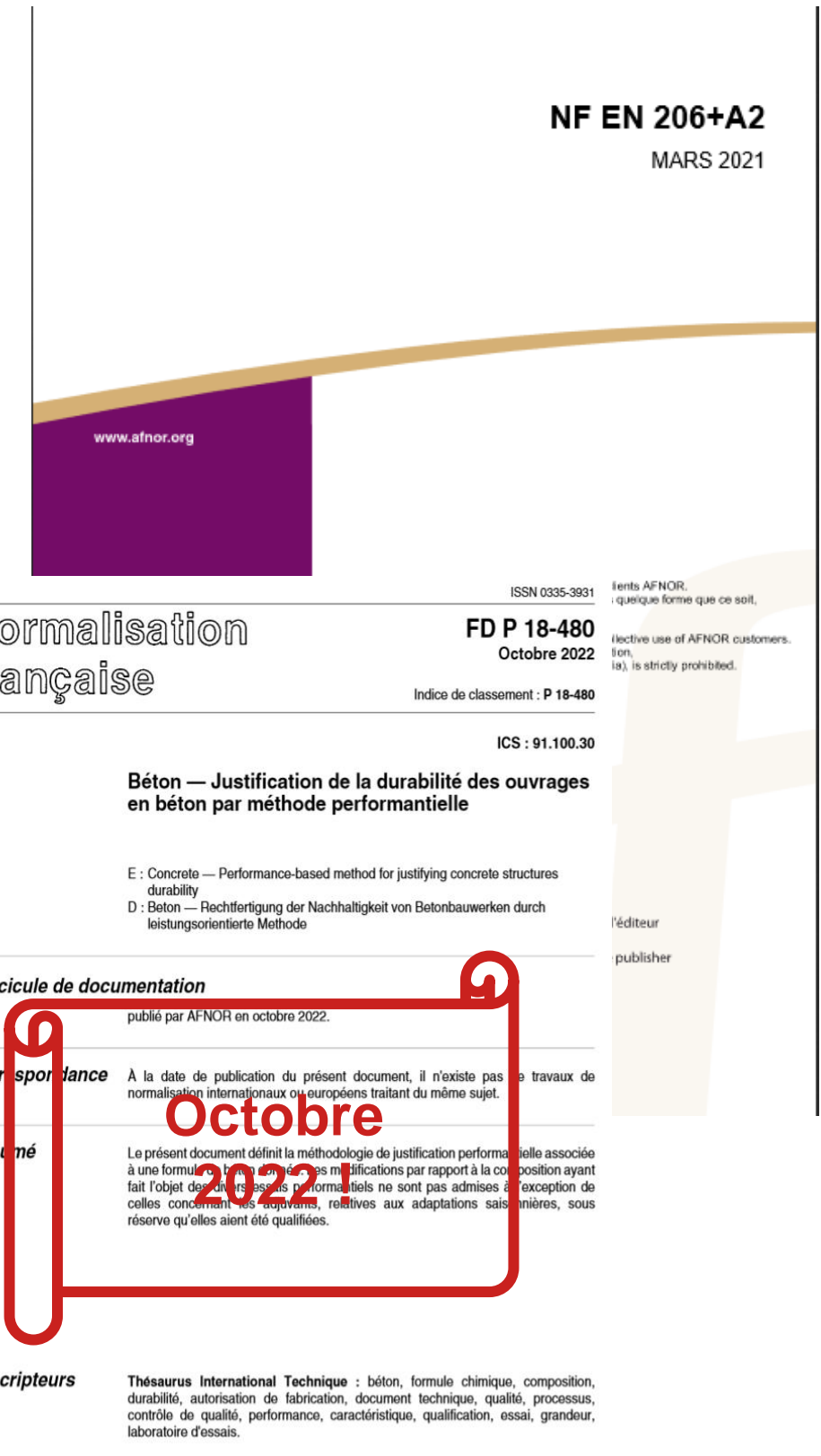
Fascicule N°65

EXECUTION DES OUVRAGES DE GENIE CIVIL EN BETON

Version 1.0 - Décembre 2017

Fascicule 65

1/171



Approche performantielle absolue

Norme NF EN 206 / Fascicule FD P18-480

5.3.3 Méthodes performantielles

(1) Les exigences liées aux classes d'exposition peuvent être établies en utilisant des méthodes performantielles pour la durabilité et peuvent être spécifiées en termes de paramètres performantiels, par exemple une mesure d'écaillage du béton au cours d'un essai de gel-dégel. L'utilisation d'une méthode performantielle est soumise aux dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton.

NOTE Une série de méthodes d'essai performantielles européennes est en cours d'élaboration, par exemple la CEN/TS 12390-9, la CEN/TS 12390-10, la CEN/TS 12390-11 et le CEN/TR 15177 ; les conditions cadres pour le mode opératoire de détermination de la durabilité équivalente ont été publiées en tant que CEN/TR 16563.

Approche performantielle absolue

Étapes de la démarche

1) Choix de la durée d'utilisation du projet

2) Prise en compte des conditions environnementales et des principaux risques de dégradation

→ Choix des classes d'exposition et des niveaux de prévention

3) Sélection des indicateurs de durabilité et des spécifications « performantielles » associées

4) Formulation des bétons - épreuves d'étude

→ vérifications de l'atteinte des performances des formulations

5) Réalisation des épreuves de convenance et de contrôle

→ vérifications des performances des formules mises en œuvre par un laboratoire indépendant

6) Point zéro durabilité et suivi (témoins de durée de vie)

Evolution de l'approche performantielle

Projet PerfDub (2015-2019)



Objectif : Définir une méthodologie à l'échelle nationale de justification de la durabilité des bétons (et des structures en béton) par une approche performantielle, incluant la méthode « absolue » et la méthode « comparative »

Budget : 3,8 millions d'euros

Afin d'introduire l'approche performantielle dans le contexte normatif, il faut disposer :

- De modèles de durabilité robustes, fiables et utilisables en contexte opérationnel
- De modes opératoires robustes pour la caractérisation des propriétés de durabilité
- De bases de données et de retours d'expériences sur les bétons et ouvrages existants
- De critères d'état limites pour les différentes phases de la vie de l'ouvrage



Evolution de l'approche performantielle

Projet PerfDub



Construction du projet en cinq thèmes :

thème 1 : Essais de durabilité

indicateurs de durabilité caractérisant les propriétés du béton
essais de vieillissement accéléré (exemple : carbonatation accélérée)

thème 2 : Définition des seuils de performance admissibles

identification des paramètres de formulation et de confection prépondérants sur la durabilité
caractérisation de formules « courantes » conformes à la norme NF EN 206-1 ou au F65 ;
exploitation d'expertises disponibles sur ouvrages anciens et corps d'épreuve anciens ;
utilisation de modèles de vieillissement

thème 3 : Bétons à étudier – bétons de référence

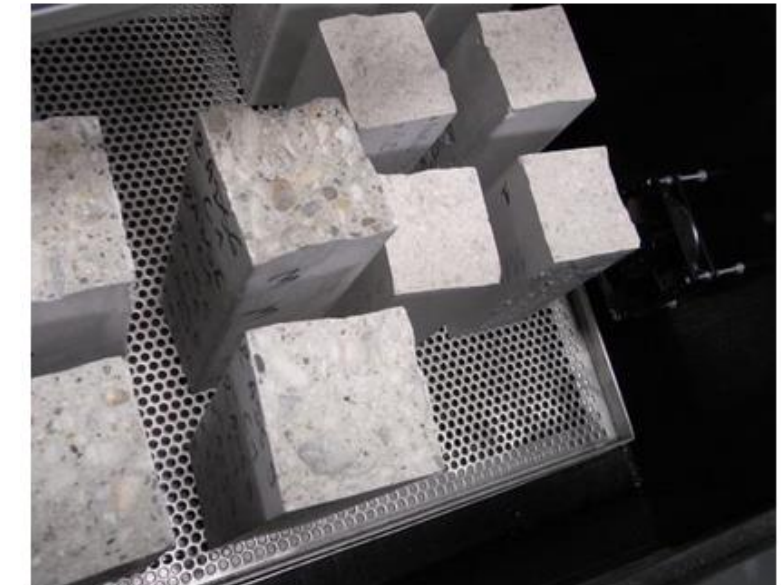
Paramètres/Variabilité

thème 4 : Contractualisation de l'approche

thème 5 : Valorisation des résultats

Evolution de l'approche performantielle

Projet PerfDub



Campagne expérimentale

→ 41 formulations de béton définies dans le cadre du projet seront fabriquées dans 4 laboratoires partenaires industriels, de juin 2017 à mars 2018.

→ Les corps d'épreuve des 2500 éprouvettes seront soumis aux méthodes d'essais élaborées lors de la première tranche : porosité à l'eau, absorption capillaire, perméabilité au gaz, diffusion des ions chlorures, carbonatation accélérée, attaques chimiques externes (attaque sulfatique externe, biodégradation et lixiviation).

→ La durabilité de ces 41 formulations de béton (conformes aux exigences de la norme NF EN 206/CN ou non et représentatives des pratiques actuelles ou futures) sera ainsi évaluée, couvrant la majeure partie des classes d'exposition.

→ Valider des modes opératoires pour caractériser la durabilité des bétons.

Lien vers les résultats du projet Perfdub : <https://www.youtube.com/watch?v=9L2nkV2FUw8>

Evolution de l'approche performantielle

Projet PerfDub

Campagne expérimentale : exemple

Pour étudier le vieillissement naturel du béton armé, les mêmes bétons sont exposés aux conditions extérieurs au CERIB (Ile de France) et à La Rochelle dans une zone de marnage.



Evolution de l'approche performantielle

Projet PerfDub / ANR Modevie

Modélisation du vieillissement des ouvrages en béton

Mise en place d'un modèle permettant de lier la dépassivation du béton et la corrosion des armatures

Données d'entrée :

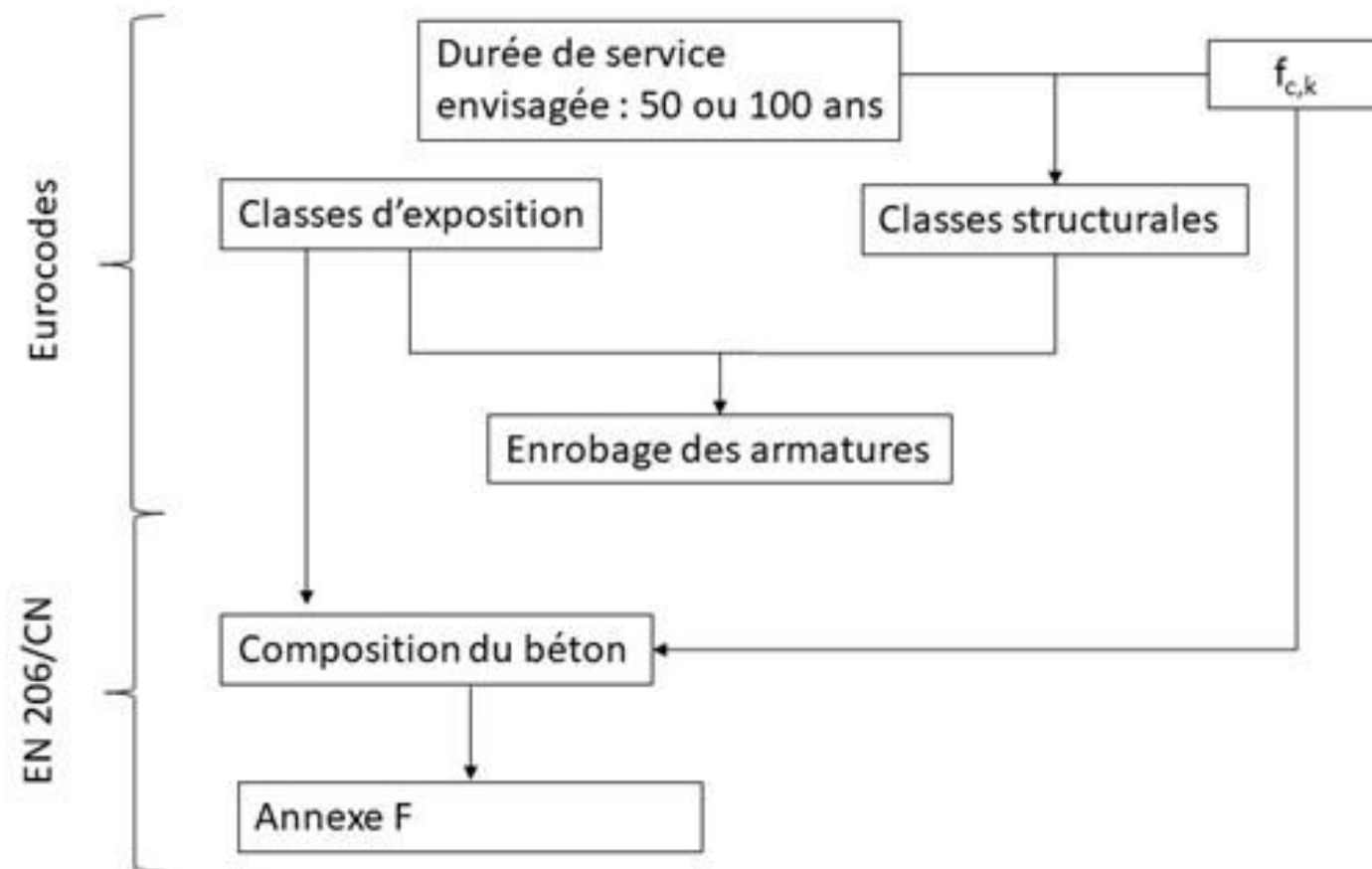
- Propriétés physico-chimiques
- Formulations

Sorties :

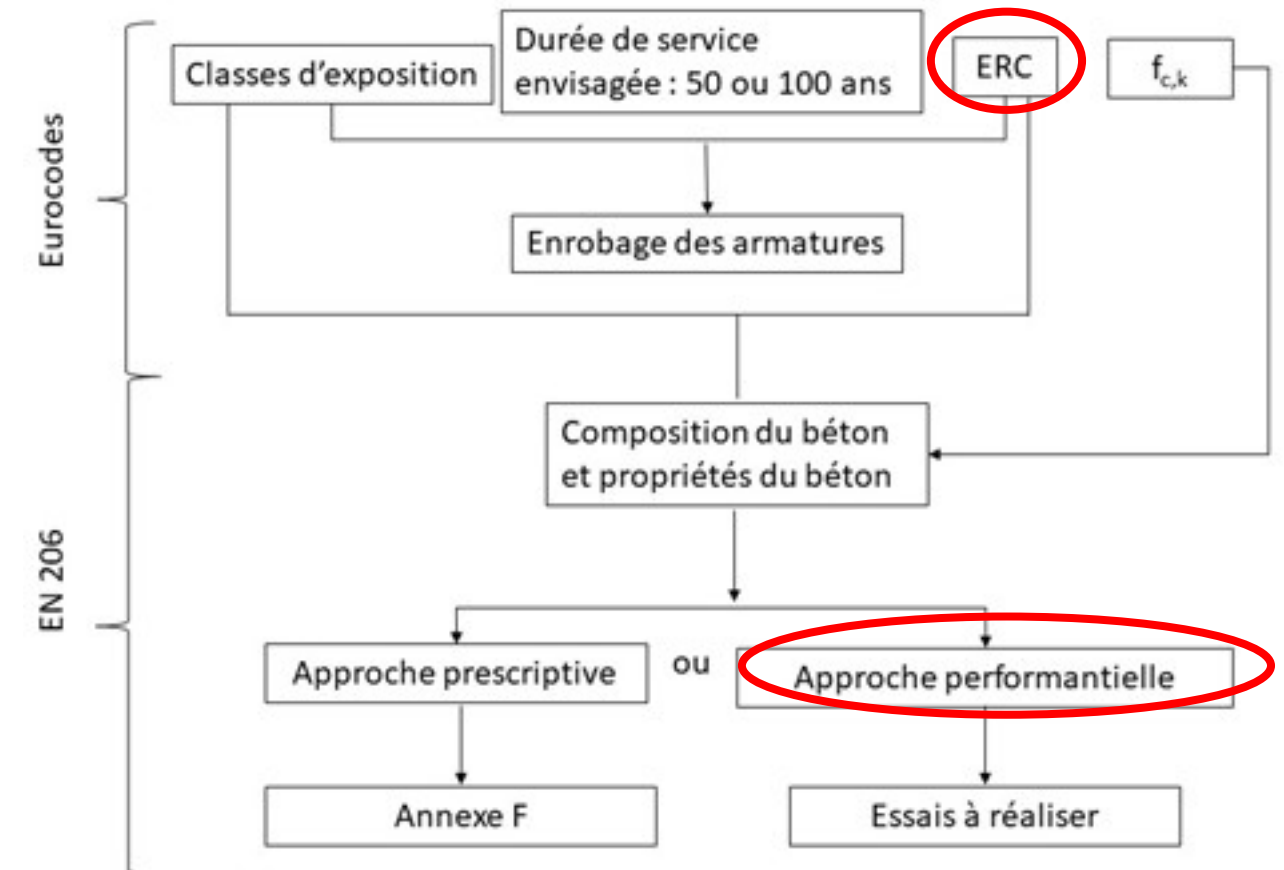
- Profondeur de carbonatation
- Concentrations en ions chlorures
- Épaisseur d'acier perdue

Évolutions envisagées de l'Eurocode

Systeme actuel



Systeme envisagé



Notion d'ERC - Exposure Resistance Classes / classes de résistance à l'exposition

→ catégoriser les bétons en se basant sur leurs performances vis-à-vis des principaux environnements agressifs pouvant conduire à la corrosion des armatures

Le fascicule FD P 18-480 introduit des valeurs des indicateurs de durabilité à respecter en fonction des classes d'exposition

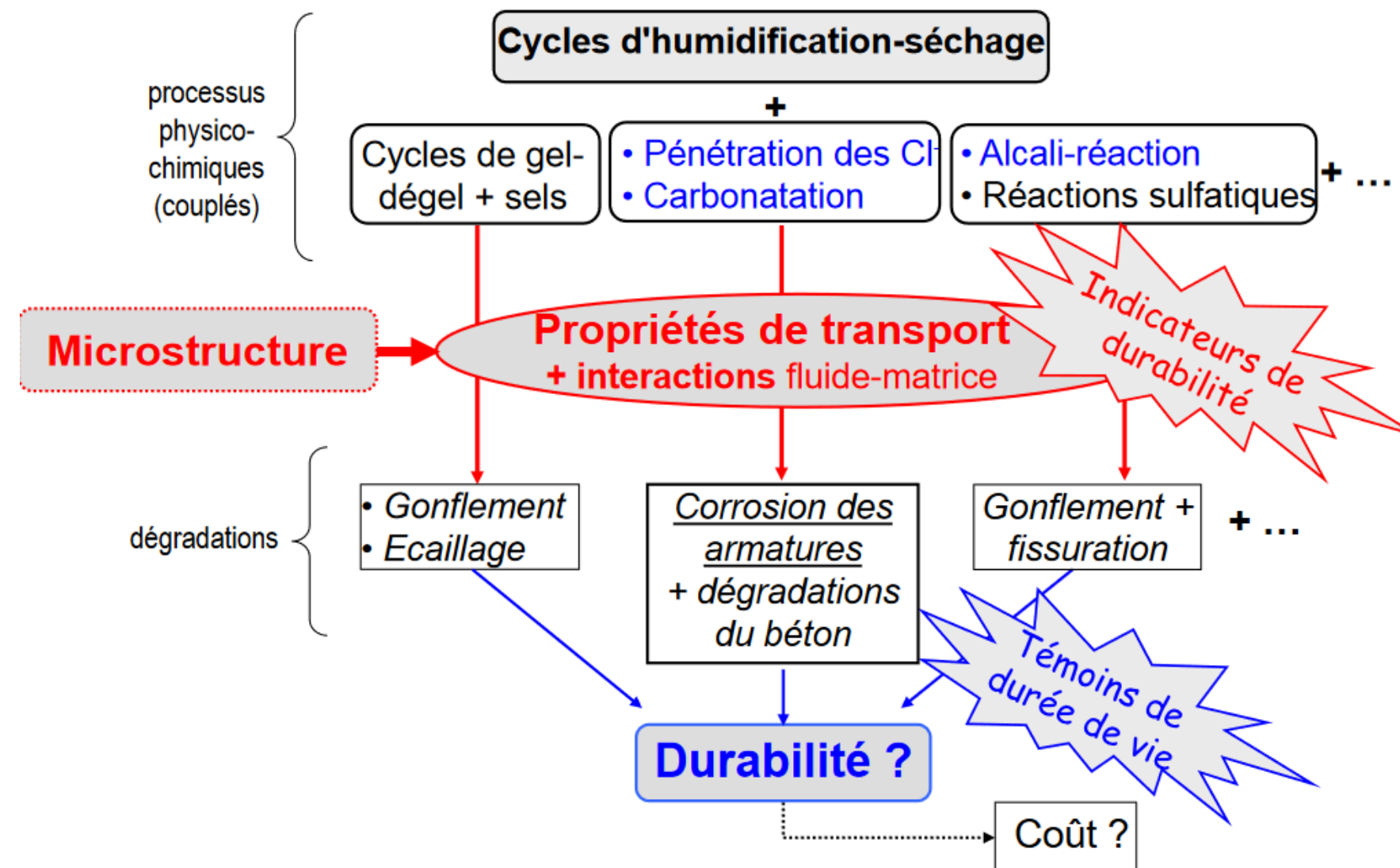
<https://www.cerib.com/eurocode-2-evolutions-envisagees-definition-enrobages-armatures-cadre-de-revision-cours/>

Essais performantiels et indicateurs de durabilité

Indicateurs de durabilité

Présentation

Indicateurs de durabilité : Paramètres-clés (matériau) pour la quantification (équations) et la prédiction (modèles) de la durabilité. Leur détermination doit être fiable et facile au moyen d'essais de laboratoire validés (précision, reproductibilité,...), sur éprouvettes de laboratoire ou sur prélèvements



Indicateurs de durabilité

Indicateurs généraux

Valables pour plusieurs types de dégradation

Porosité accessible à l'eau

Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorures

Perméabilité au gaz et à l'eau

Teneur en portlandite

Indicateurs de substitution

Porosité accessible au mercure

Résistivité électrique

Quantité d'électricité

Coefficient de diffusion du CO₂ ou de l'O₂

Coefficient de l'eau tritiée

Coefficient d'absorption capillaire

Indicateurs spécifiques

à un processus de dégradation donné

Alcali-réaction

Dégradations dues au gel

Paramètres complémentaires

Caractéristiques de la structure poreuse

Caractéristiques du réseau de fissures initial

Degré d'hydratation du ciment

Nature des hydrates

Teneur en C-S-H

Taux de saturation en eau

Isotherme de sorption-désorption

Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau

Chaleur d'hydratation

Déformation endogène

Résistance mécanique en traction

Corrosion des armatures par les chlorures:

-Isotherme d'interaction chlorures-matrice ou capacité de fixation

-Concentration en chlorures à la surface exposée

Pour l'alcali-réaction:

-Caractéristiques pétrographiques des granulats

-Variations dimensionnelles d'éprouvettes de mortier ou de béton

Porosité accessible à l'eau (NF P 18-459) P_{eau}

Conservation des éprouvettes

Réalisation d'éprouvettes 110mm *220 mm
Conservation dans l'eau

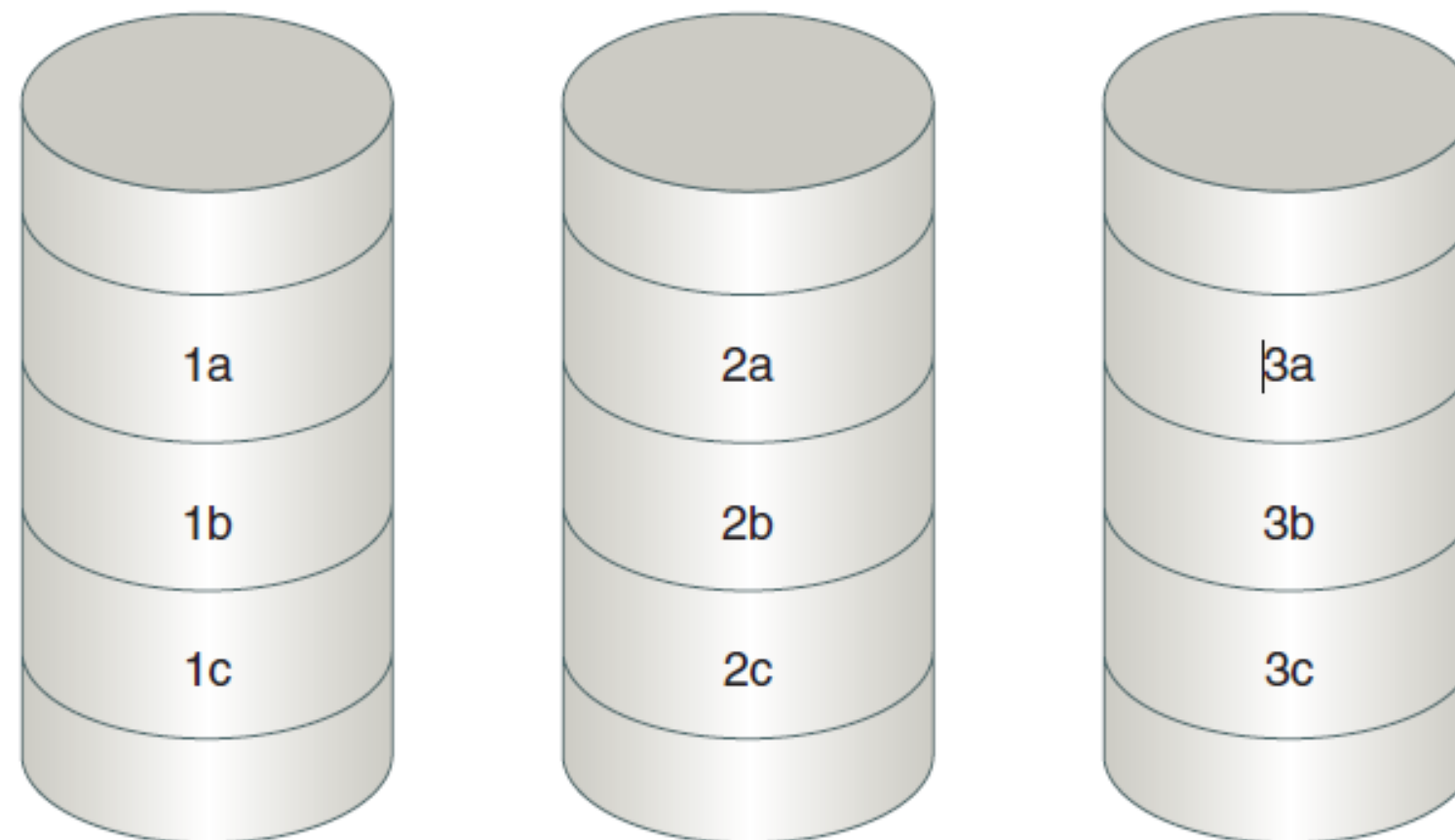


Fig. 1 - Schéma de découpe des éprouvettes.

Porosité accessible à l'eau

Protocole : séchage et imbibition



Séchage



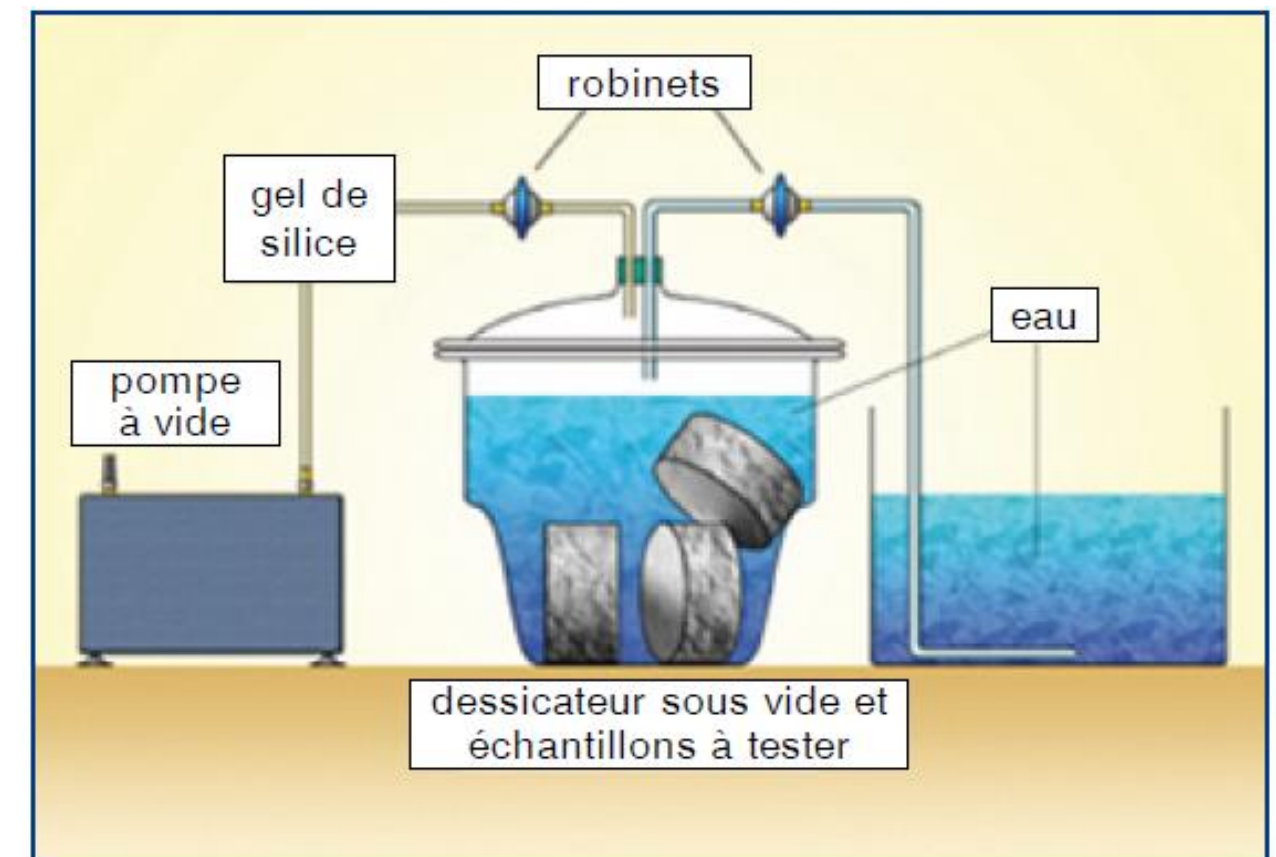
Imbibition



Pesée hydrostatique

Imbibition :

- 4h sous vide
- 44h sous eau



Porosité accessible à l'eau

Protocole : Pesées



Séchage M_{sec}



Imbibition

M_{air}^{imb} et M_{eau}^{imb}

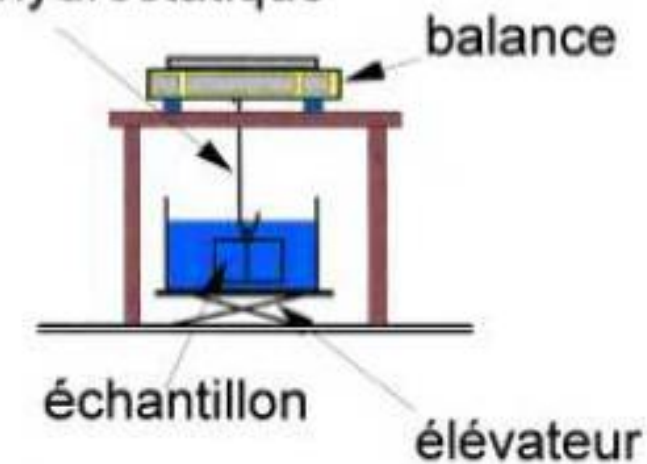


Pesée hydrostatique

Imbibition :

- 4h sous vide
- 44h sous eau

crochet pour pesée hydrostatique



$$\epsilon = \frac{M_{air}^{imb} - M_{sec}}{M_{air}^{imb} - M_{eau}^{imb}} * 100$$

Porosité accessible à l'eau

Intérêt

- Évaluation de la qualité générale du matériau (paramètre global)
- Contrôle de la production de bétons ayant des caractéristiques prédéfinies
- Calcul d'autres indicateurs de durabilité (Exemple : sert à calculer le coefficient de diffusion du CO₂)
- Spécifications de durabilité limitées à des seuils sur ce paramètre dans le cas [ouvrage-type + environnement peu agressif + durée de vie courte]
- Prédiction de la durée de vie (données d'entrée de tous les modèles, ...)

Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorures

c : concentration en ions chlorures libres dans la solution interstitielle

1ère loi de Fick

$$J_x = -D_{eff} \frac{\partial c}{\partial x}$$

2ème loi de Fick

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{app} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Coefficient de diffusion effectif

- est valable dans une solution idéale
- on néglige les interactions électriques entre les chlorures et les autres ions présents
- les ions se déplacent suivant une direction perpendiculaire à la surface d'entrée dans un milieu homogène
- flux massique J (en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), représentant la quantité d'ions se déplaçant à travers une unité de surface de béton pendant une seconde

Coefficient de diffusion apparent

- Le coefficient de diffusion apparent est fonction non seulement du matériau (composition, âge, état de carbonatation, fissuration, ...), mais également des conditions environnementales (concentration en chlorures, température, ...).
- Ce coefficient dépend de la concentration en ions dans la solution et de la fixation des chlorures dans le béton

Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorures

c : concentration en ions chlorures libres dans la solution interstitielle

1ère loi de Fick

$$J_x = -D_{eff} \frac{\partial c}{\partial x}$$

2ème loi de Fick

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{app} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

$$D_{app} = \frac{D_{eff}}{\left(\Phi + \rho \cdot \frac{\partial m_b}{\partial c_f} \right)} \quad (10)$$

Φ : porosité du matériau accessible aux chlorures (en $m^3.m^{-3}$),

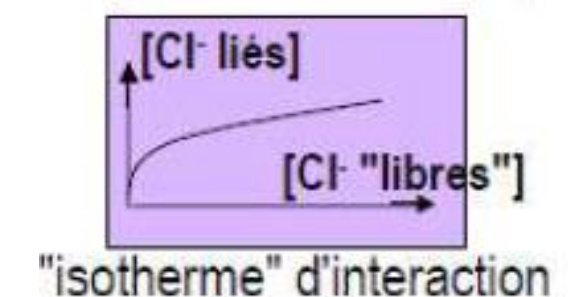
m_b : masse de chlorures liés par unité de masse de solide sec (en $kg.kg^{-1}$),

c_f : concentration en chlorures "libres" de la solution interstitielle (en $kg.m^{-3}$),

ρ : masse volumique apparente du matériau à l'état sec (en $kg.m^{-3}$),

$k_d = \frac{\partial m_b}{\partial c_f}$: pente de l'isotherme d'interaction chlorures-matrice (appelée

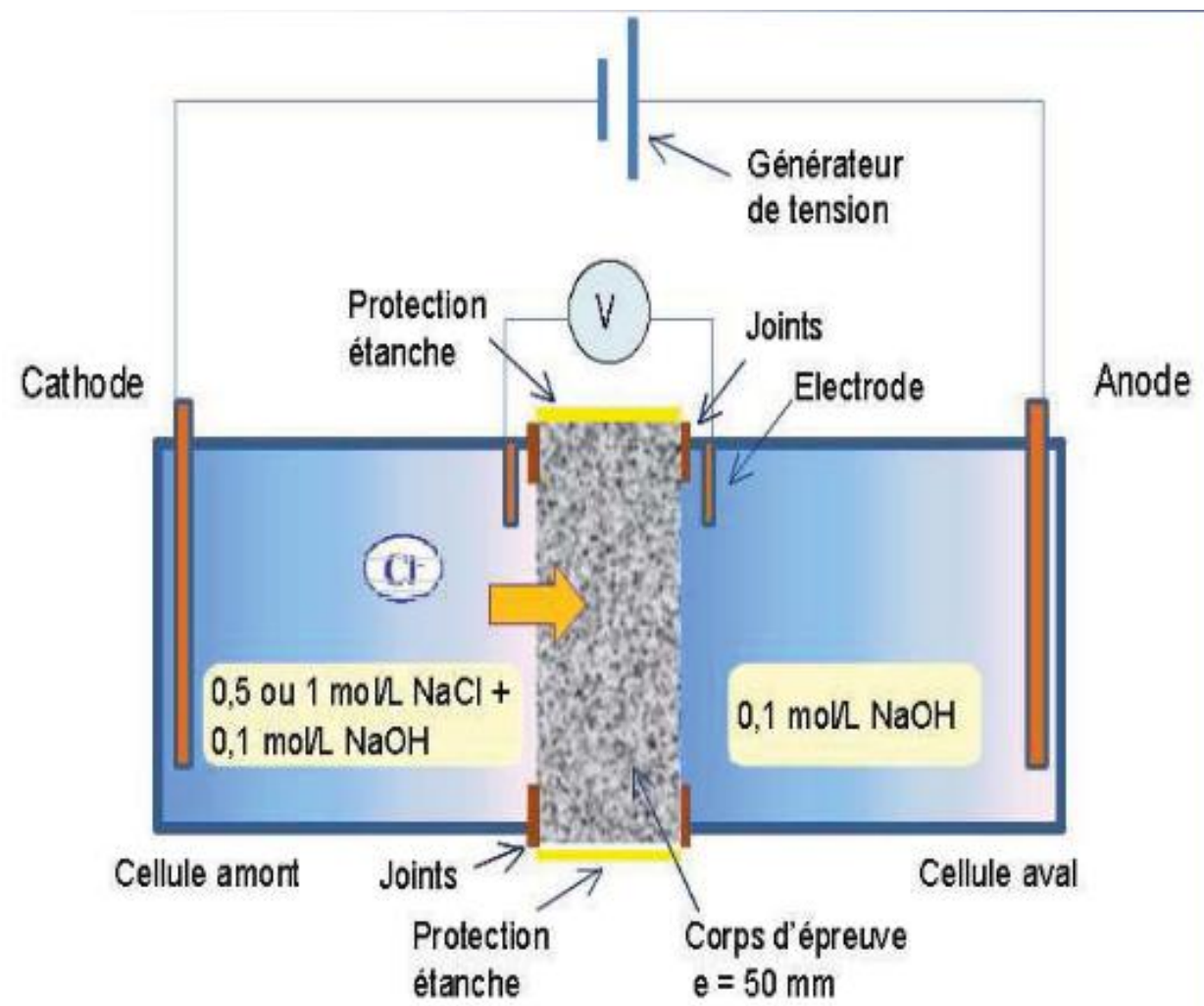
capacité de fixation ou encore coefficient de partage).



Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorures

Protocole : Coefficient de migration accéléré (XP P 18-462)

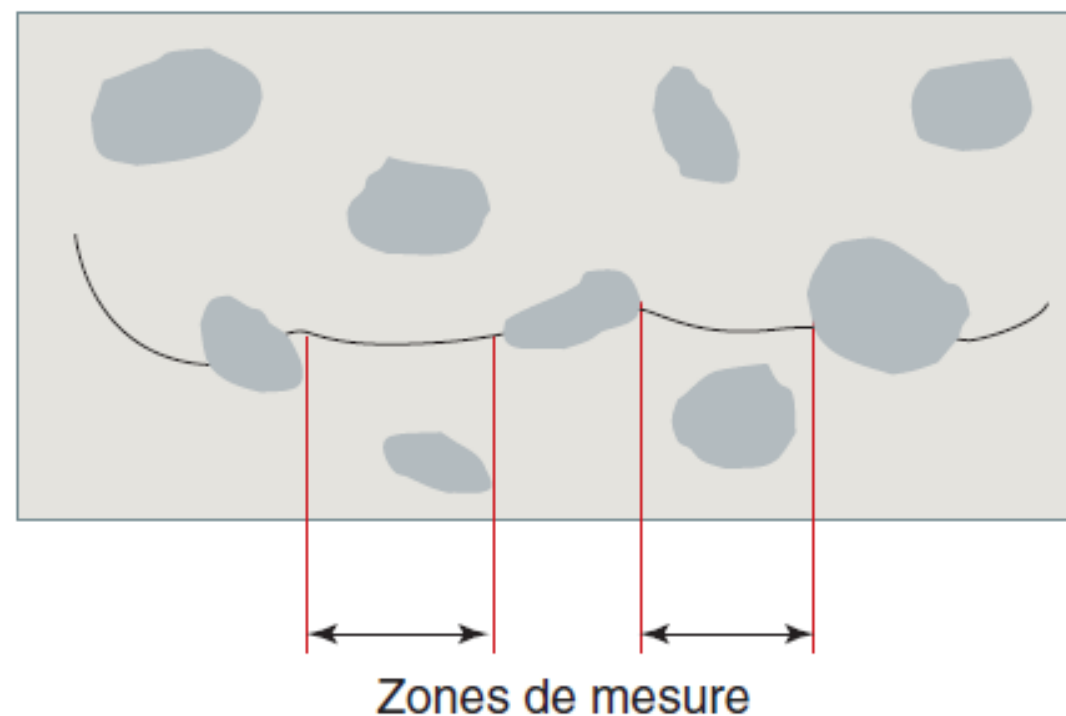
Essais de migration sous champ électrique



Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorures

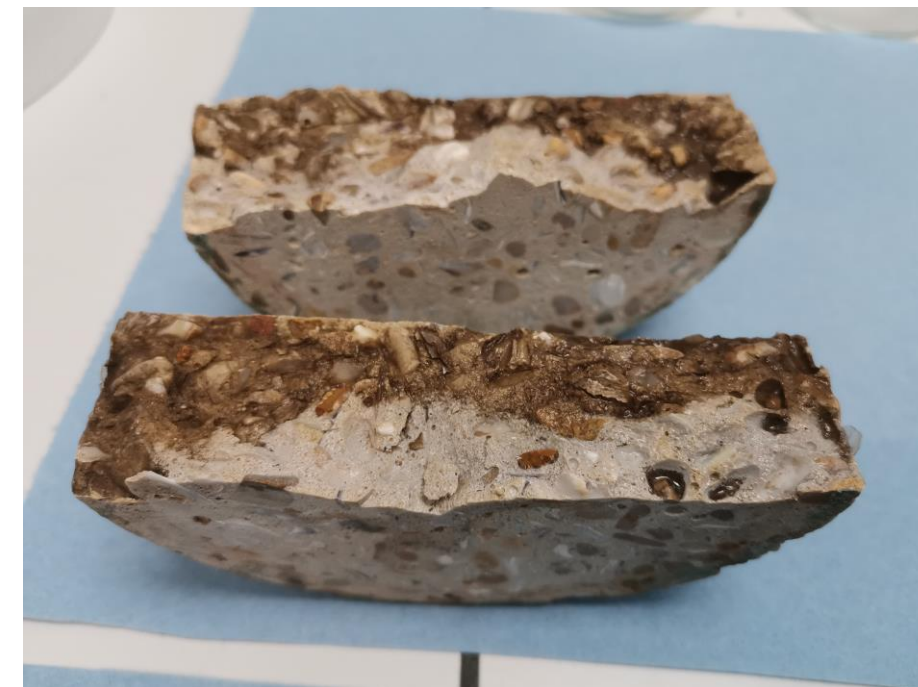
Protocole

Fendage des éprouvettes et mesure de la profondeur de pénétration des ions par nitrate d'argent



Le coefficient de diffusion apparent des chlorures est calculé à partir de :

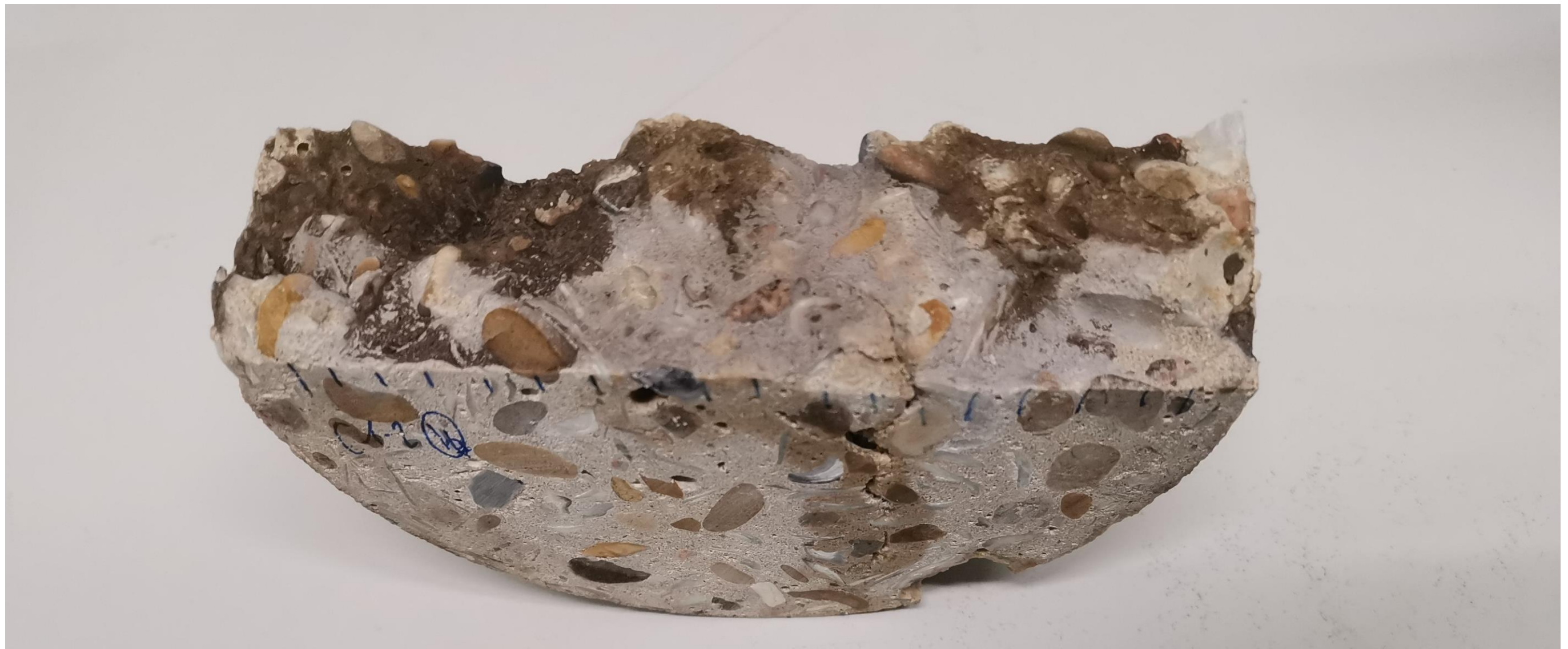
- la profondeur de pénétration
- la durée de l'essai
- la différence de potentiel



Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorures

Impact des fissures sur la diffusion

Ne fonctionne que sur matériau non fissuré



Perméabilité au gaz

Définition

La perméabilité quantifie l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous gradient de pression totale.

Vitesse apparente du fluide est régie par la **loi de Darcy**

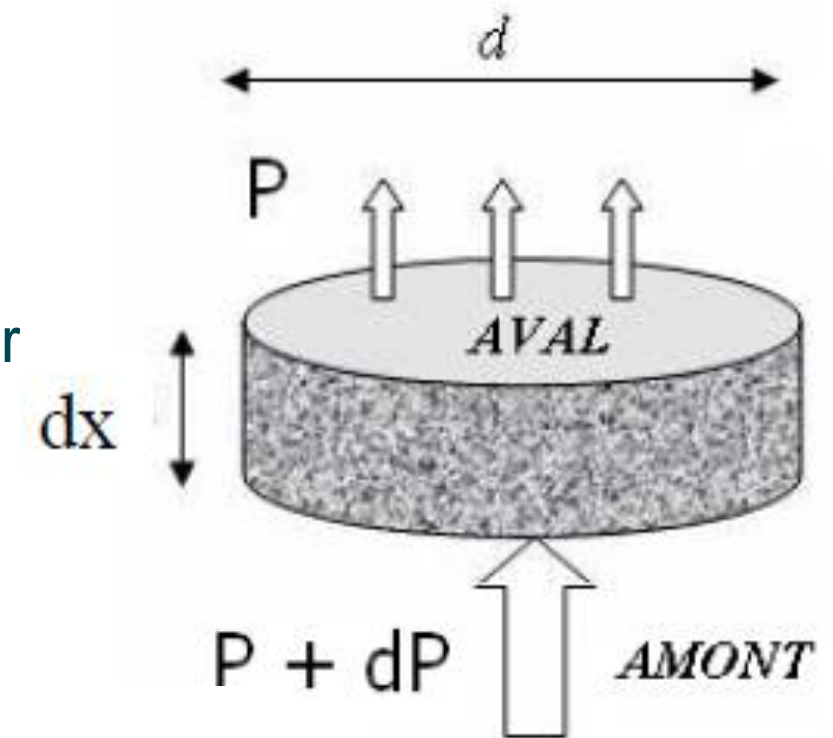
$$\bar{v} = -\frac{K}{\eta} \cdot k_r(S) \cdot \bar{\nabla}p \quad (11)$$

$\bar{\nabla}_p$: gradient de pression auquel est soumis l'échantillon de matériau,

$k_r(S)$: perméabilité relative au fluide qui est fonction du taux de saturation en eau S (cf. § 6.2.4.2),

η : viscosité dynamique du fluide,

K : perméabilité *intrinsèque* du matériau, théoriquement indépendante des phases saturantes.



Perméabilité apparente K_{app}

Perméabilité au gaz

Protocole

- Soumettre le corps d'épreuve à un gradient de pression de gaz constant avec l'appareil CEMBUREAU
- La perméabilité est alors déterminée à partir de la mesure du flux de gaz le traversant
- Valeur exprimée pour un taux de saturation du béton (à déterminer à partir des pesées réalisées).



Teneur en portlandite

Importance

Agressions chimiques d'origine externe

Ca(OH)₂ a une forte solubilité

- très sensible aux agressions chimiques externes (attaques acides)
- lixiviation (effet négatif)

Alcali-réaction

Ca(OH)₂ : source d'ions Ca⁺⁺

- rôle important dans la précipitation de produits expansifs (effet négatif)

Corrosion des armatures

Dans un matériau sain : NaOH + KOH + Ca(OH)₂ → pH env. 13,5

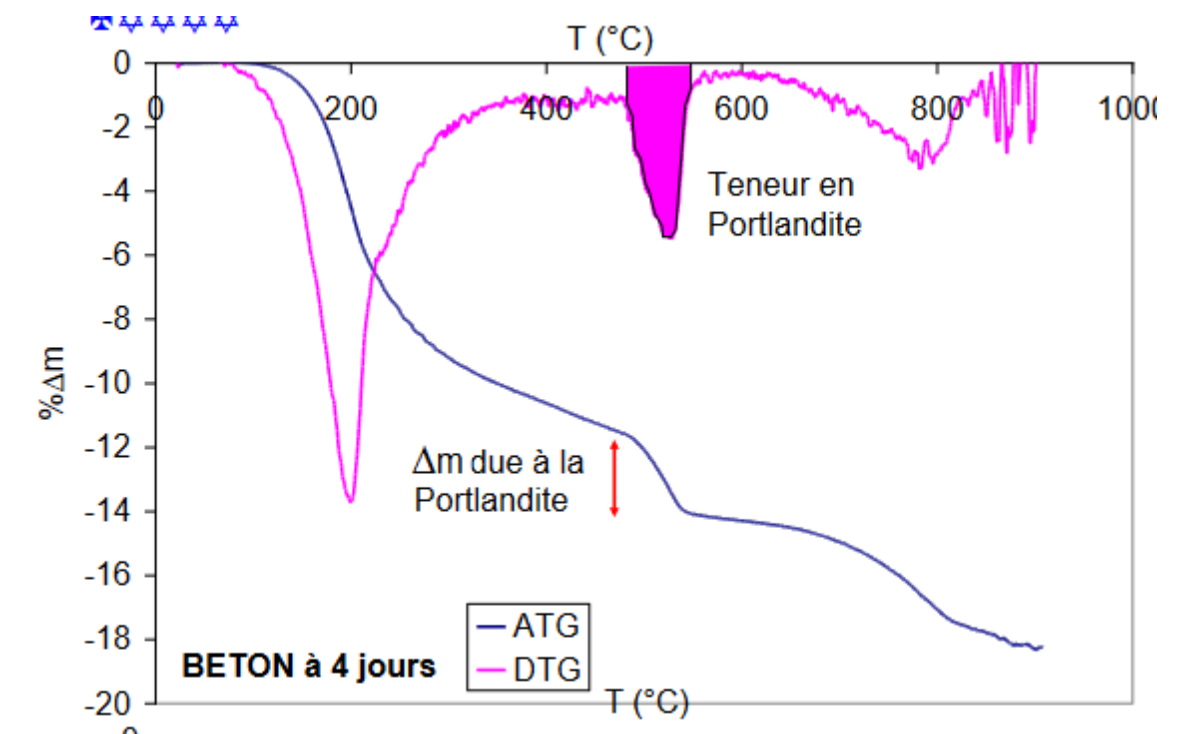
Réserve de Ca(OH)₂ : effet tampon (pH = 12,4) dans solution interstitielle

- maintien d'un pH basique
 - assurance et maintien de la passivation des armatures (effet positif)
- or Ca(OH)₂ est le principal produit d'hydratation touché par la carbonatation
- teneur en Ca(OH)₂ : donnée d'entrée des modèles de carbonatation

Teneur en portlandite

Mesure par Thermogravimétrie (ATG)

Mesure de la variation de la masse en fonction de la température
 → Deshydroxylation de la portlandite autour de 550°C



| Type de béton → | Béton sans addition pouzzolannique | | BHP-BTHP | Béton aux cendres | Béton au laitier | | | | |
|--|------------------------------------|--------------------------------------|----------------|--------------------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
| | CEM I 52,5 PM ES | CEM II 32,5 au filler calc. | 5 à 12 % FS | CEM II 32,5 (25 % CV) | CEM II 32,5 | CEM III/A | CEM III/B | CEM III/C | CEM V/A PM ES |
| Teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (% / masse initiale de ciment) | 22-26 | 19-22 | 13-20 | 20 | 15-18 | 8-15 | 4-6 | 3-5 | 8-12 |

Carbonatation accélérée

Protocole XP P 18-458

On place les échantillons de béton dans une enceinte avec un taux de CO_2 contrôlé et élevé

Au bout d'un certain temps, le béton est fendu et on applique de la phénolphthaléine : celle-ci se colore en rose si le pH est supérieur à 9

Deux zones se forment :

- la zone carbonatée en gris
- la zone non carbonatée en rose



Porosité par intrusion de mercure (MIP)

Protocole

- Intrusion d'un liquide non mouillant et non réactif dans un milieu poreux
- Lorsque la pression augmente, le mercure pénètre dans des pores de plus en plus petits

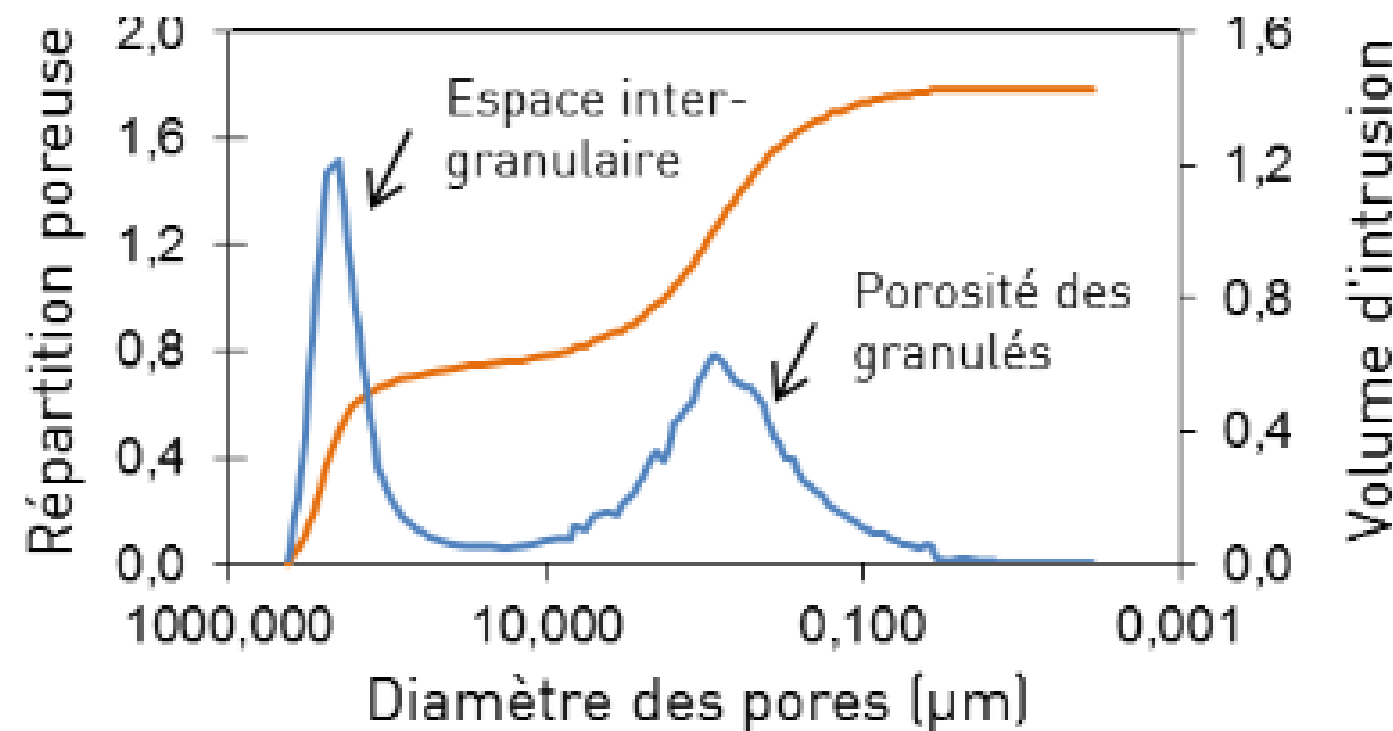
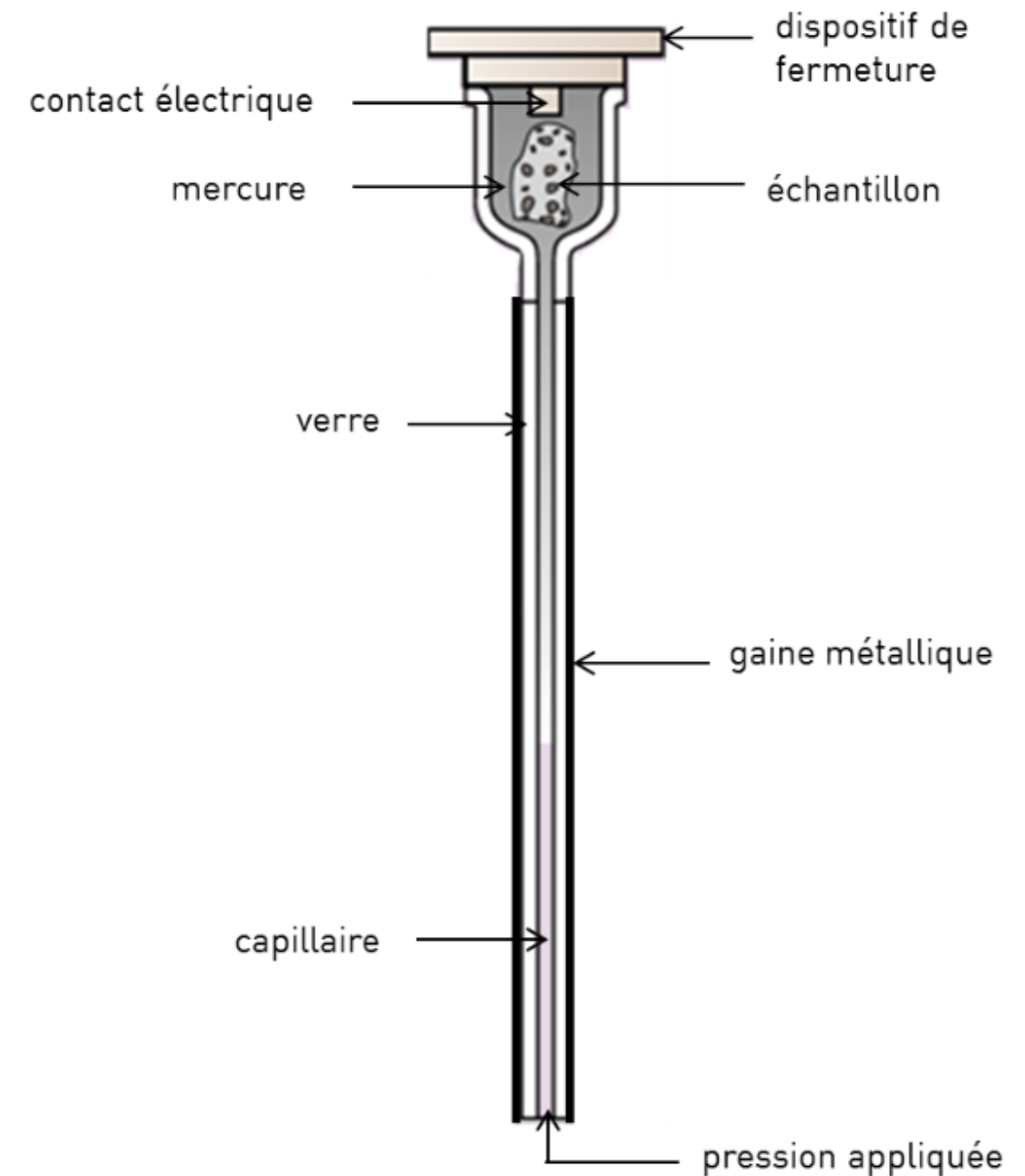


Schéma en coupe d'une cellule de mesure contenant l'échantillon et le mercure sous pression :



<https://www.cttc.fr/wp-content/uploads/2018/03/porosimetre-par-intrusion-de-mercure-1.pdf>

Résistivité électrique (XP P 18-481)

Protocole

- Saturation sous vide des échantillons
- Placer les échantillons entre deux éponges reliées aux électrodes de mesure. Placer une masse de 2 kg au dessus du dispositif. Réaliser la mesure d'impédance
- Réaliser la même mesure d'impédance sans l'échantillon (valeur à vide)

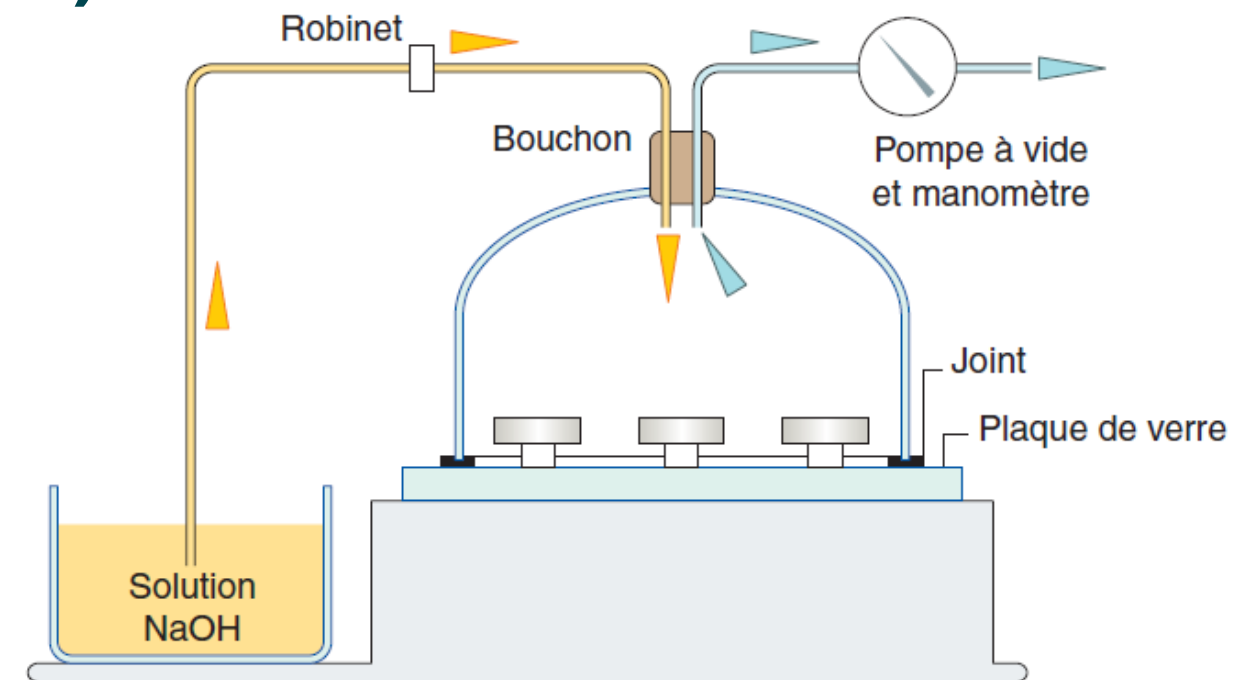


Fig. 2 - Schéma de principe.



Fig. 3 - Vues du dispositif.

Résistivité = (impédance – valeur à vide) * section/épaisseur

Résistivité électrique

Lien avec le coefficient de diffusion des chlorures

Il est possible de déterminer le coefficient de diffusion effectif des ions chlorure D_{eff} (en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) à partir d'une mesure de résistivité électrique (exprimée en $\Omega \cdot \text{m}$) effectuée sur un béton sain, saturé en eau, selon la relation (correspondant à une solution diffusante contenant NaCl)

$$D_{\text{eff}} = \frac{2 \cdot 10^{-12}}{\rho}$$

Indicateurs spécifiques à l'alcali-réaction

Choix des indicateurs

Les indicateurs doivent permettre de modéliser la réaction au niveau de la (micro)structure du matériau et notamment le processus de formation des produits d'alcali-réaction au sein de la matrice

Indicateurs chimiques

→ Quantité de silice libérée par les granulats

→ concentration en alcalins équivalents actifs de la solution interstitielle

Bilan des alcalins équivalents

Teneur totale : $T = CA + BAb + UAu + EAe$

CA : Alcalins actifs du Ciment (prise en compte du clinker et des additions)

BAb : Alcalins libérables des granulats

UAu : Alcalins des adjuvants (donnée fournisseur)

UAu : Alcalins de l'eau de gâchage

Indicateur global et macroscopique

→ Déformations de gonflement d'éprouvettes en béton

Indicateurs de durabilité

Approche performantielle

Essais pris en compte

3 Indicateurs principaux :

Porosité accessible à l'eau : P_{eau} en %

Perméabilité aux gaz : K_{gaz} en 10^{-18} m^2

Coef. de diffusion des chlorures : D_{app} en $10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

+ mesure de résistivité (pour les épreuves d'études, de convenance et de contrôle)

| | Approche absolue | Approche comparative |
|--------------------|--|-------------------------------|
| Indicateur général | $P_{\text{eau } 28\text{j}}$ | $Ab_{\text{eau } 28\text{j}}$ |
| XC1/XC2 | $P_{\text{eau } 90\text{j}}$ | Carbo _{90j} |
| XC3/XC4 | $P_{\text{eau } 90\text{j}}, K_{\text{gaz } 90\text{j}}$ | Carbo _{90j} |
| XD1/XD2 XS1/XS2 | $P_{\text{eau } 90\text{j}}, D_{\text{app } 90\text{j}}$ | $D_{\text{app } 90\text{j}}$ |
| XD3 XS3 | $P_{\text{eau } 90\text{j}}, K_{\text{gaz } 90\text{j}}, D_{\text{app } 90\text{j}}$ | $D_{\text{app } 90\text{j}}$ |

Indicateurs de durabilité

Nouveau fascicule

5 Niveaux d'application de la méthode performantielle

Le processus applicable, incluant le « niveau de contrôle » (constitution du dossier technique, fréquence des essais notamment), est fonction de la catégorie d'ouvrage ou de la catégorie de partie d'ouvrage concernée.

Ces catégories sont les suivantes :

- les éléments à l'intérieur des bâtiments, non structurels ou ne contribuant pas à la stabilité structurelle des ouvrages, les éléments et ouvrages provisoires ou facilement remplaçables, relèvent en général de la catégorie 1 ;
- les bâtiments et certains ouvrages courants de génie civil conçus pour une durée de vie de 50 ans relèvent de la catégorie 2 ;
- la catégorie 3 concerne les ouvrages conçus pour une durée de vie 100 ans et les ouvrages exceptionnels (centrales nucléaires, barrages, tunnels, bâtiments de prestige, etc.).

La classification des éléments en vue de l'application de la méthode performantielle est décidée par le maître d'ouvrage. Les niveaux recommandés pour l'application de la méthode performantielle sont indiqués dans le Tableau 1.

Tableau 1 — Niveaux recommandés d'application de la méthode performantielle

| Classe d'exposition de la partie d'ouvrage | XC1 | XA | Autres classes |
|--|-----|----|----------------|
| 1 | N1 | N2 | N1 |
| 2 | N1 | N2 | N2 |
| 3 | N2 | N3 | N3 |

Tableau 12 — Modalités d'application des épreuves d'études, de convenance et de contrôle du béton

| Niveau | N1 | N2 | N3 |
|------------|--|--|---|
| ETUDE | Essais de durabilité en épreuve d'étude (paragraphe 7.2) | Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j) | Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j) Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j) |
| | Interprétation des résultats d'étude | Conformité aux seuils avec marge de sécurité imposée | Sur nominale : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils (avec marge de sécurité imposée pour l'approche absolue et les classes XC, XS et XD) Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils et cohérence avec les variations de composition testées |
| CONVENANCE | Essais de durabilité en épreuve de convenance (paragraphe 7.3) | Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) | Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j) |
| | Interprétation des résultats de convenance | Conformité aux limites associées aux résultats d'étude | Conformité aux limites associées aux résultats d'étude et, pour les grandeurs associées à la durabilité (90 j), conformité aux seuils |
| CONTRÔLE | Essais de durabilité en épreuve de contrôle (paragraphe 7.4) | Non Applicable | Indicateurs généraux à 28 jours + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j) |
| | Fréquence des résultats de contrôle | Non Applicable | Indicateurs généraux : tous les 500 m ³ ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1 000 m ³ ou tous les 2 mois Grandeurs associées à la durabilité : - tous les 2 ans pour l'ensemble des classes d'exposition |

Indicateurs de durabilité

Approche performantielle

Chaque classe d'exposition est associée à des seuils à atteindre pour les indicateurs de durabilité

| | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 | XD1/XS1 | XD2/XS2 | XD3/XS3 |
|---|------|------|-----|------|---------|---------|---------|
| $P_{\text{eau } 90j}$ (%) | 15,5 | 15,5 | 15 | 14,5 | 14 | 14 | 13 |
| $K_{\text{gaz } 90j}$ (10^{-18} m^2) | - | - | 200 | 200 | - | - | 200 |
| $D_{\text{app } 90j}$ ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) | - | - | - | - | 7 | 7 | 3,5 |

$P_{\text{eau } 90j}$: Porosité accessible à l'eau par absorption sous vide mesurée selon la norme NF P 18-459, exprimée en %.

$K_{\text{gaz } 90j}$: Perméabilité apparente au gaz mesurée selon la norme XP P 18-463 après séchage complet, exprimée 10^{-18} m^2 .

$D_{\text{app } 90j}$: Coefficient de diffusion apparent des chlorures mesuré selon la norme XP P 18-462, exprimé en $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Specification des valeurs à obtenir d'après le nouveau fascicule FD P18-480

Tableau 3 — Seuils de performance (à 50 ans et 100 ans) pour la porosité à l'eau divisée par la fraction volumique de pâte

| Classe d'exposition | Modulation selon la classe de résistivité à 90 j selon XP P 18-481 ($\Omega.m$) | Porosité caractéristique accessible à l'eau (selon NF P 18-459)/Fraction volumique de pâte $P_{eau,k,90j} / fV_p$ (%) | |
|---------------------|---|--|-------------|
| | | DUP 50 ans | DUP 100 ans |
| XC1 | < 100 | 65 % | 65 % |
| | 100 à 175 | | |
| | > 175 | | |
| XC2 | < 100 | 65 % | 60 % |
| | 100 à 175 | 65 % | 65 % |
| | > 175 | | |
| XC3 | < 100 | 50 % | 50 % |
| | 100 à 175 | 55 % | |
| | > 175 | | |
| XC4 | < 100 | 50 % | 50 % |
| | 100 à 175 | 55 % | 50 % |
| | > 175 | 65 % * | 55 % * |

* Les valeurs avec astérisque sont liées à un enrobage supérieur à celui correspondant à la classe XC3 et à une forte résistivité du béton qui freine la propagation de la corrosion.

Specification des valeurs à obtenir d'après le nouveau fascicule FD P18-480

Tableau 4 — Seuils de performance (à 50 et 100 ans) sur la base d'un essai de migration des chlorures

| Classe d'exposition | Modulation selon la classe de facteur de vieillissement | Coefficient caractéristique de migration des ions chlorure selon XP P 18-462 $D_{rcm,k,90j} (x 10^{-12} m^2 / s)$ | |
|---------------------|---|--|-------------|
| | | DUP 50 ans | DUP 100 ans |
| XS1 | 0,30 à 0,39 | 16 (28*) | 9 (16*) |
| | 0,40 à 0,49 | 28 | 22 |
| | 0,50 à 0,59 | | |
| | 0,60 et plus | | |
| XS2 | 0,30 à 0,39 | 5 (9*) | 3 (5*) |
| | 0,40 à 0,49 | 9 | 5 |
| | 0,50 à 0,59 | 16 | 9 |
| | 0,60 et plus | | |
| XS3e | 0,30 à 0,39 | 5 | 5 |
| | 0,40 à 0,49 | 9 | 9 |
| | 0,50 à 0,59 | 16 | 16 |
| | 0,60 et plus | 22 | 22 |
| XS3m | 0,30 à 0,39 | 2 | 2 |
| | 0,40 à 0,49 | 3 | 3 |
| | 0,50 à 0,59 | 5 | 5 |
| | 0,60 et plus | 9 | 9 |

* Les valeurs avec astérisque sont applicables pour des bétons dont la porosité à l'eau mesurée à 90 jours (valeur caractéristique associée à un fractile de 90 %) est inférieure ou égale à 13,5 %.

Indicateurs de durabilité

Approche performantielle

Épreuves de convenance et de contrôles réalisées par un deuxième laboratoire indépendant

Epreuves de convenance :

$$P_{\text{eau}}(\text{convenance})_{28j} \leq 1,1 P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$$

$$\rho(\text{convenance})_{28j} \geq 0,8 \rho(\text{étude})_{28j}$$

Epreuves de contrôle :

| Epreuves de contrôle à 28 jours | Epreuves de contrôle à 90 jours |
|---|---|
| $\rho(\text{contrôle})_{28j} \geq 0,8 \rho(\text{étude})_{28j}$ | $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{90j} \leq P_{\text{eau}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ |
| $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{28j} \leq 1,1 P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$ | $K_{\text{gaz}}(\text{contrôle})_{90j} \leq K_{\text{gaz}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ |
| | $D_{\text{app}}(\text{contrôle})_{90j} \leq D_{\text{app}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ |

Indicateurs de durabilité

Classes et valeurs limites

| | | Classes et valeurs limites | | | | |
|---|--|----------------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Durabilité potentielle → | | Très faible | Faible | Moyenne | Elevée | Très élevée |
| G | Porosité accessible à l'eau (%) P_{eau} | | 14 à 16 | 12 à 14 | 9 à 12 | 6 à 9 |
| S | Porosité mesurée par intrusion de mercure ($P_{Hg\ max} = 400\ MPa$ et prétraitement par étuvage à $T = 45\ ^\circ C$ pendant 14 jours en présence de gel de silice) (%) P_{Hg} | > 16 | 13 à 16 | 9 à 13 | 6 à 9 | 3 à 6 |
| S | Résistivité électrique ($\Omega.m$) ρ | < 50 | 50 à 100 | 100 à 250 | 250 à 1000 | > 1000 |
| G | Coefficient de diffusion <i>effectif</i> des chlorures ($10^{-12}\ m^2.s^{-1}$) D_{eff} | > 8 | 2 à 8 | 1 à 2 | 0,1 à 1 | < 0,1 |
| G | Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de migration) ($10^{-12}\ m^2.s^{-1}$) $D_{app(mig)}$ | | | | 1 à 5 | < 1 |
| G | Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de diffusion) ($10^{-12}\ m^2.s^{-1}$) $D_{app(dif)}$ | > 50 | 10 à 50 | 5 à 10 | < 5 | |
| G | Perméabilité apparente aux gaz (à $P_{entrée} = 0,2\ MPa$ et après étuvage à $T = 105\ ^\circ C$) ($10^{-18}\ m^2$) K_{gaz} | > 1000 | 300 à 1000 | 100 à 300 | 10 à 100 | < 10 |
| G | Perméabilité à l'eau liquide (à P_{max} , par mesure directe du flux, après saturation, cf. § 7.2.4.1 et 7.2.4.2) ($10^{-18}\ m^2$) $k_{liq}^{(*)}$ | > 10 | 1 à 10 | 0,1 à 1 | 0,01 à 0,1 | < 0,01 |
| <i>Type de béton (indicatif et pour des formules simples)</i> | | | <i>B25 à B40</i> | <i>B30 à B60</i> | <i>B55 à B80</i> | <i>> B80</i> |

Indicateurs de durabilité

Spécifications

| | | | | | Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / | Type d'environnement ↓ | |
|--|---|--|--------------------------------------|------------------|---|------------------------------|--|
| > 120 ans <i>Ouvrages dits exceptionnels</i> | de 100 à 120 ans <i>Grands ouvrages</i> | de 50 à 100 ans <i>Bâtiment et Ouvrages de génie civil</i> | de 30 à 50 ans <i>Bâtiment</i> | < 30 ans | ← Niveau d'exigence | | |
| Niveau 5 | Niveau 4 | Niveau 3 | Niveau 2 | Niveau 1 | | | |
| • $P_{eau} < 9$ • $K_{gaz} < 10$ | • $P_{eau} < 12$ • $K_{gaz} < 100$ | • $P_{eau} < 14$ ⁽⁶⁾ | • $P_{eau} < 16$ | • $P_{eau} < 16$ | Sec et très sec (HR<65%) ou humide en permanence | 1 | Corrosion induite par carbonatation (e = 30 mm) |
| • $P_{eau} < 9$ • $k_{liq} < 0,01$ | • $P_{eau} < 12$ • $K_{gaz} < 100$ | • $P_{eau} < 14$ ⁽⁶⁾ | • $P_{eau} < 16$ | • $P_{eau} < 16$ | Humide (HR>80%) | 2 | |
| • $P_{eau} < 9$ • $K_{gaz} < 10$ • $k_{liq} < 0,01$ | • $P_{eau} < 9$ • $K_{gaz} < 10$ ⁽⁴⁾ | • $P_{eau} < 12$ ⁽⁷⁾ • $K_{gaz} < 100$ ⁽⁸⁾ | • $P_{eau} < 14$ ⁽⁵⁾ | • $P_{eau} < 15$ | Modérément humide (65<HR<80%) | 3 | |
| • $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 1$ • $K_{gaz} < 10$ • $k_{liq} < 0,01$ | • $P_{eau} < 9$ • $K_{gaz} < 10$ • $k_{liq} < 0,01$ | • $P_{eau} < 12$ ⁽⁷⁾ • $K_{liq} < 0,1$ ⁽⁹⁾ | • $P_{eau} < 14$ ⁽⁶⁾ | • $P_{eau} < 16$ | Cycles fréquents d'humidification-séchage | 4 | |
| • $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 10$ • $K_{gaz} < 10$ • $k_{liq} < 0,01$ | • $P_{eau} < 12$ • $D_{app(mig)} < 20$ • $K_{liq} < 0,1$ ⁽³⁾ | • $P_{eau} < 14$ | • $P_{eau} < 15$ | • $P_{eau} < 16$ | 5.1 [Cl] faible ⁽¹⁾ | 5 | Corrosion induite par les chlorures (e = 50 mm) |
| • $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 1$ • $K_{gaz} < 10$ • $k_{liq} < 0,01$ | • $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 1$ • $K_{gaz} < 10$ • $k_{liq} < 0,01$ | • $P_{eau} < 11$ • $D_{app(mig)} < 2$ • $K_{liq} < 0,1$ ⁽³⁾ | • $P_{eau} < 11$ | • $P_{eau} < 14$ | 5.2 [Cl] forte ⁽²⁾ | | |
| • $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 1$ | • $P_{eau} < 12$ • $D_{app(mig)} < 5$ | • $P_{eau} < 13$ • $D_{app(mig)} < 7$ | • $P_{eau} < 13$ | • $P_{eau} < 15$ | Immersion dans l'eau contenant des chlorures | 6 | |
| • $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 1$ • $K_{gaz} < 10$ • $k_{liq} < 0,01$ | • $P_{eau} < 10$ • $D_{app(mig)} < 2$ • $K_{gaz} < 100$ • $k_{liq} < 0,05$ | • $P_{eau} < 11$ • $D_{app(mig)} < 3$ • $K_{liq} < 0,1$ ⁽³⁾ | • $P_{eau} < 11$ | • $P_{eau} < 14$ | Zone de marnage | 7 | |

Indicateurs de durabilité

Synthèse

| | Paramètres à déterminer | Méthode | Délai d'obtention du résultat (1) | Durée totale de l'essai (2) | Précision de la mesure (3) | Evaluation du coût | Observations |
|--|--|---|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|
| Indicateurs de durabilité généraux | Porosité accessible à l'eau (%) | Pesée hydrotatique | 15 jours | 3,5 mois | 1,5 % | * | |
| | Coefficient <i>apparent</i> ou <i>effectif</i> de diffusion des chlorures ($m^2.s^{-1}$) | Migration en régime stationnaire | 15 jours | 4 mois | 15 % de la valeur moyenne | ** | |
| | | Migration en régime non stationnaire | 1 semaine | 3,5 mois | 15 % de la valeur moyenne | ** | |
| | | Diffusion en régime non stationnaire | 3 mois | 6 mois | 15 % de la valeur moyenne | *** | |
| | Perméabilité aux gaz (m^2) | CEMBUREAU | 45 jours | 4,5 mois | 30 % de la valeur moyenne | ** | équipement spécifique |
| | Perméabilité à l'eau liquide (m^2) | Perméamètre à eau sous pression (NF P 18-855) | 15 jours | 3,5 mois | 1 ordre de grandeur | * | |
| | Teneur en $Ca(OH)_2$ (% massique par rapport au ciment) | ATG | 1 semaine | 3,5 mois | 1,5 % | ** | équipement spécifique |
| | | Analyse chimique | 1 semaine | 3,5 mois | 2 % | * | |
| Paramètres requis pour l'application des méthodes indirectes | Caractéristiques de la structure poreuse | Mesures par intrusion de mercure | 15 jours | 3,5 mois | 1,5 % | ** | équipement spécifique |
| | Résistivité électrique ($\Omega.m$) | [ANDR 01] | 1 semaine | 3,5 mois | 10 % de la valeur moyenne | * | |
| | Isothermes de sorption de vapeur d'eau | Méthode des solutions salines saturées (LPC n° 58) | 6 mois | 9 mois | 10 % de la valeur moyenne | *** | |
| | Isothermes d'interaction matrice- chlorures | par ex. Immersion | 2 mois | 5 mois | 10 % de la valeur moyenne | ** | |
| Indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction | Quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps ($mol.L^{-1}$) | Test cinétique NF P 18-589 ou test cinétique modifié NF P 18-594 ou méthode proposée au § 7.3.1 | 1 semaine | 1 à 2 semaines | 5 % de la valeur moyenne | ** | |
| | Bilan des alcalins de la formule de béton ($kg.m^{-3}$) | LPC n° 37 et n° 48 | 1 semaine | 1 semaine | 0,1 | ** | |
| | Déformations de gonflement ($\mu m/m$) | projet NF P 18-454 | 5 mois | 5 mois | ± 20 ($\mu m/m$) | *** | |

Prédiction de la durée de vie d'un ouvrage

Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage

Présentation

Contexte

Importance du patrimoine des ouvrages d'art en béton

Vieillesse, dégradation (corrosion, gel interne et écaillage,...)

Anticiper l'apparition des dégradations:

→ Surveiller les structures en béton (armé)

→ Évaluer l'avancement des phénomènes de dégradation

→ Pronostiquer l'échéance d'apparition des dégradations

Programmer des actions de maintenance préventive

Évaluer l'efficacité des réparations éventuelles

Indicateurs de durabilité

*Caractérisent les propriétés
du béton vis à vis d'une
dégradation donnée*

Essais en laboratoire sur
échantillons

Témoins de durée de vie

*Évaluent l'avancement du
processus de dégradation*

Essais in situ ou sur
prélèvement

Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage

Témoins de durée de vie

Durée de vie résiduelle » du béton armé vis-à-vis de la corrosion des armatures (phase d'incubation) : Temps au bout duquel le front de chlorures et/ou le front de carbonatation atteint les armatures



Profondeur de carbonatation (X c)
par méthode colorimétrique
(phénol-phtaléine)

ou

Evolution du profil de teneur en
CaCO₃ en fonction du temps



Détermination de la position du front de
chlorures par la méthode colorimétrique
(nitrate d'argent)

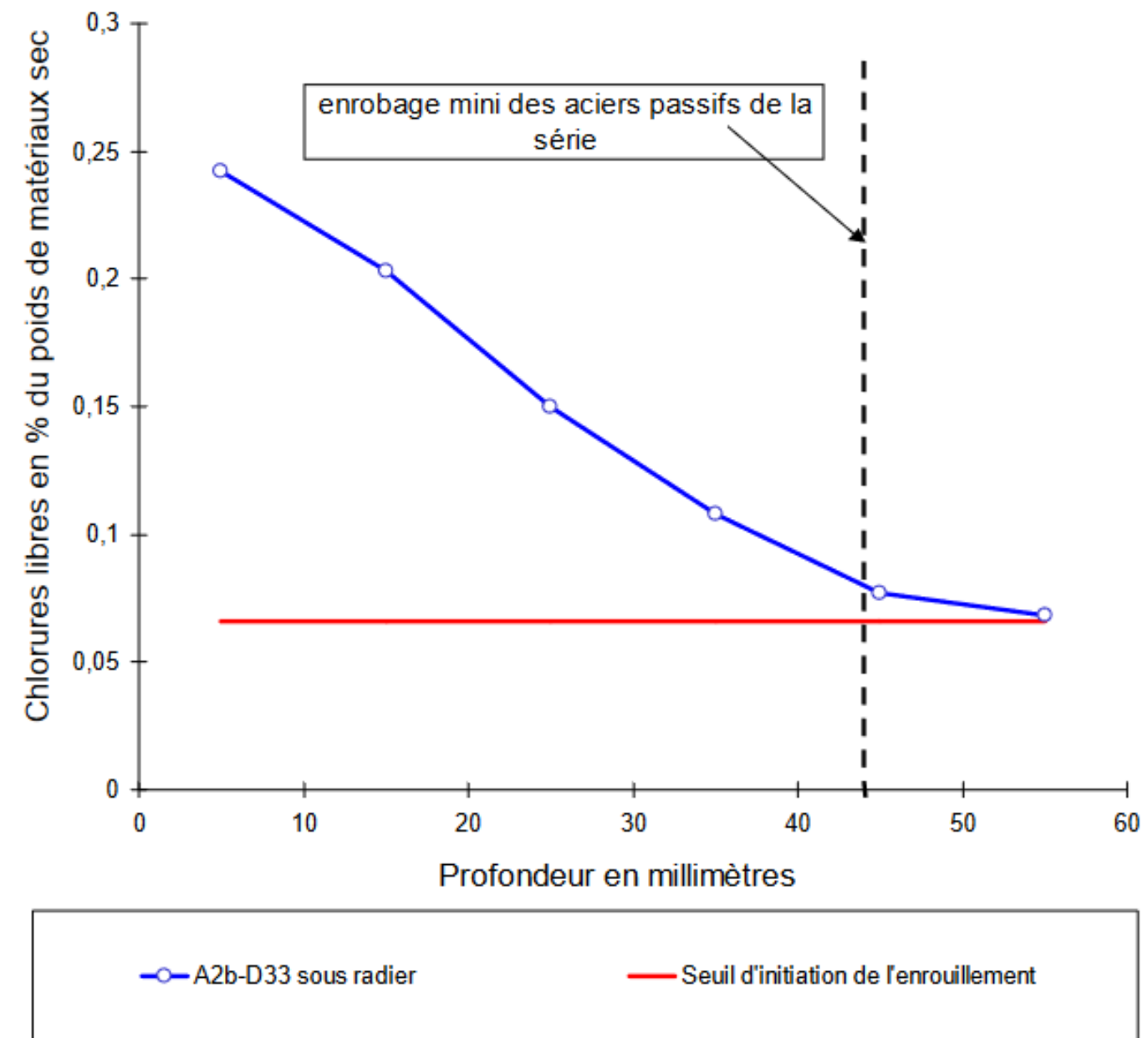
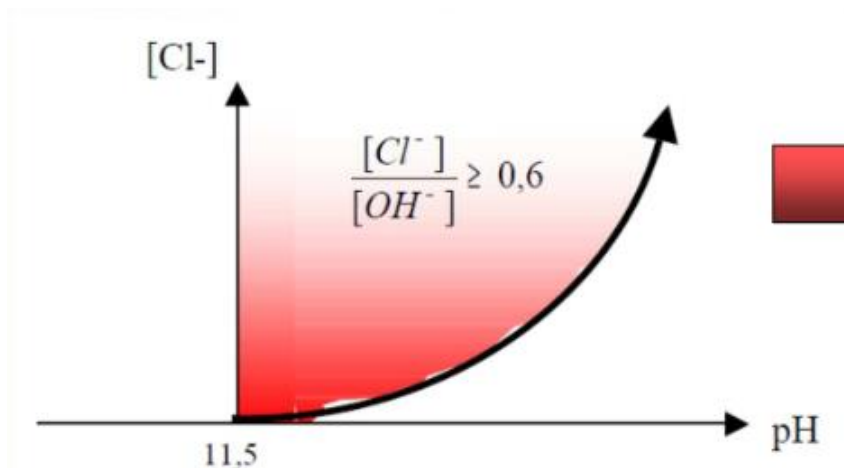
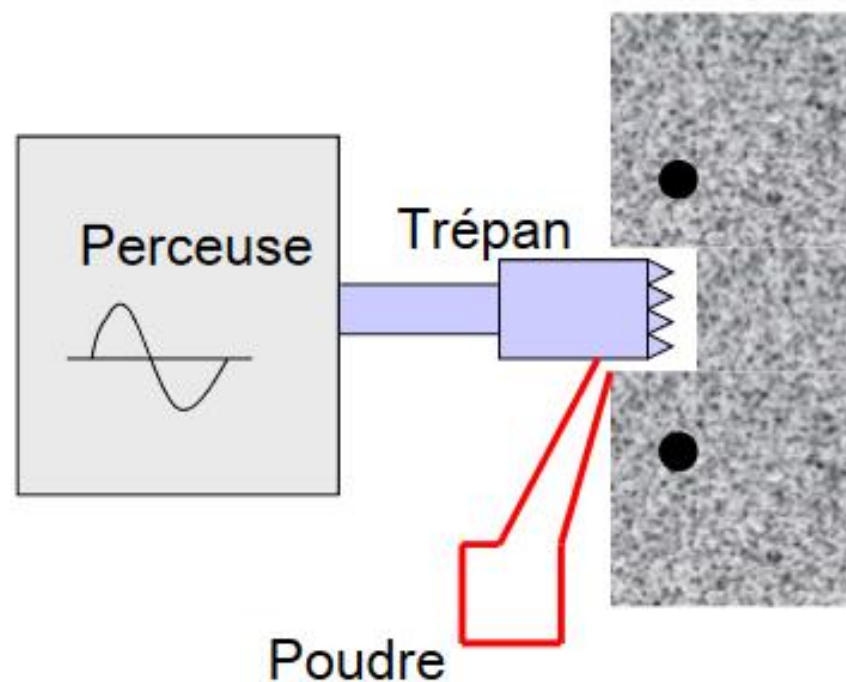
Ou

Evolution du profil des ions Cl en fonction
du temps

Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage

Témoins de durée de vie

Profil de pénétration des chlorures dans l'enrobage : la corrosion débute si la concentration en chlorure libres dépasse une valeur critique



Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage

Approche performantielle

Point zéro durabilité

Réception de l'ouvrage avec initiation du suivi dans le temps

Établissement par parties d'ouvrage d'une synthèse «durabilité » (spécifications attendues, indicateurs retenus et seuils, mesures des indicateurs, mesures des enrobages)

Définition des parties d'ouvrage qui feront l'objet d'un suivi de durabilité (nature et périodicité selon conditions d'exposition)

Inspections ciblées avec mesure des témoins de durée de vie

Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage

Approche performantielle

| | Classes de durabilité potentielle | | | | |
|--|-----------------------------------|----------|-----------|------------|-------------|
| Indicateurs de durabilité | Très faible | Faible | Moyenne | Élevée | Très élevée |
| Porosité accessible à l'eau P_{eau} (%) | > 16 | 14 à 16 | 12 à 14 | 9 à 12 | 6 à 9 |
| Coefficient de diffusion des chlorures D_{app} ($10^{-12} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) | > 50 | 10 à 50 | 5 à 10 | 1 à 5 | < 1 |
| Résistivité électrique ($\Omega \cdot \text{m}$) | < 50 | 50 à 100 | 100 à 250 | 250 à 1000 | > 1000 |

| Classe de durabilité potentielle | Durée de vie |
|----------------------------------|--------------|
| Moyenne | < 30 ans |
| Élevée | 50 à 100 ans |
| Élevée | - |

Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage

Prédiction de la durée de vie

Modèles prédictifs

-Données d'entrée: Indicateurs de durabilité

-Sorties: Témoin de durée de vie

-Utilisation :

-En phase de conception

-Suivi d'un ouvrage existant

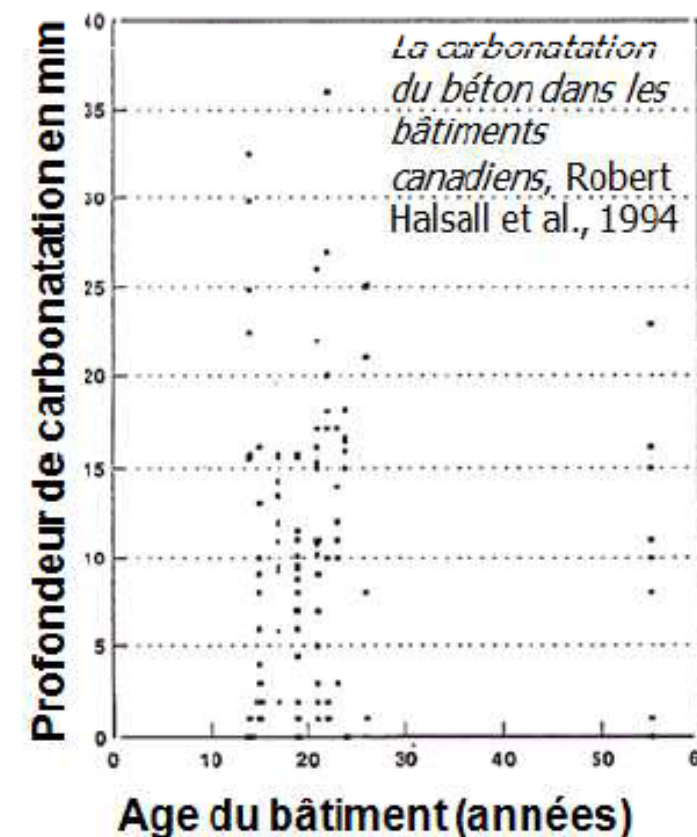
-Choix:

-Cohérence entre l'approche adoptée et celle du modèle

-Disponibilité du modèle

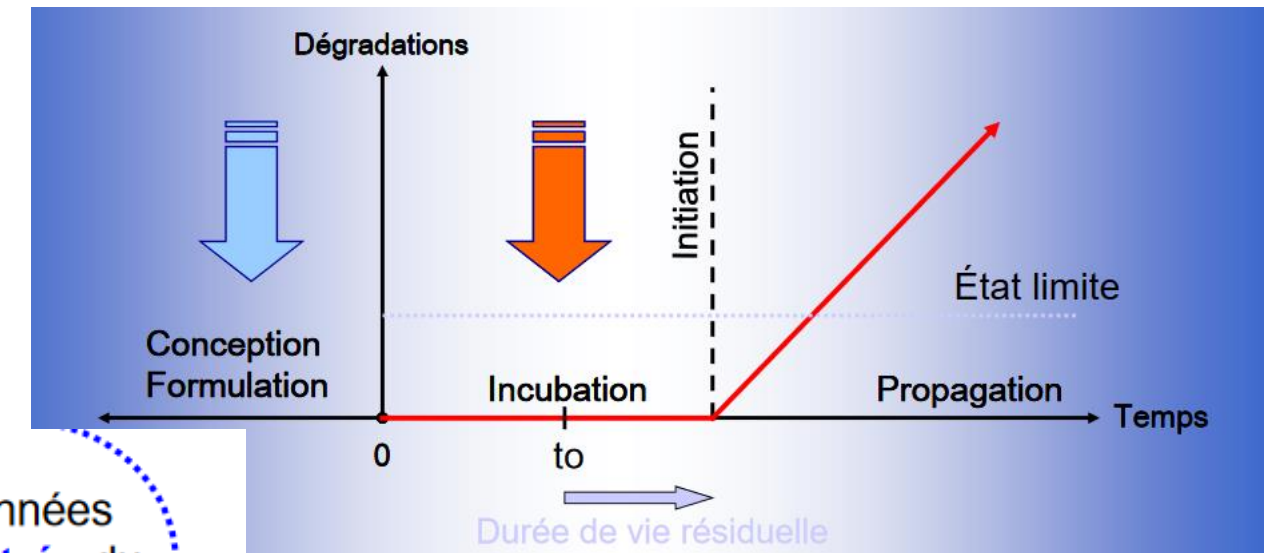
-Modèles couplés ou simples relatifs à un seul processus :

1. Evolution de la microstructure (structure poreuse)
2. Applications aux conditions partiellement saturées
 - Séchage naturel
 - Cycles réels d'humidification-séchage
3. Couplages physico-chimiques....
4. Multi-échelle : du matériau à la structure
5. Modèle probabiliste au lieu de modèle déterministe



Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage

Prédiction de la durée de vie



⊠ **Hypothèse** : restriction à la période d'incubation

Indicateurs de durabilité

données
d'entrée
du modèle

Modèle

rôle central

- équations d'état
- C.I. et C.L. - équations de transport
- "lois" de variation des indicateurs : $f(t, T^\circ, HR, x, \dots)$

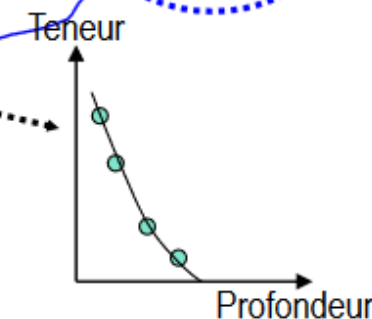
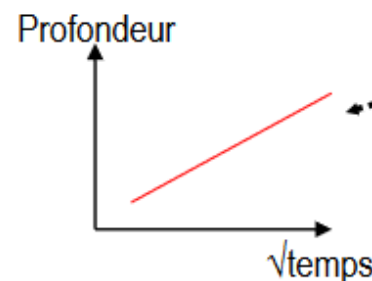
Mesure des indicateurs *in situ* à des échéances données

Calibration des "lois" incluses dans le modèle

sorties
numériques
du modèle

Témoins de durée de vie calculés

(cinétiques et/ou profils)
 $x=x(t)$ $c=c(x,t)$



Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage

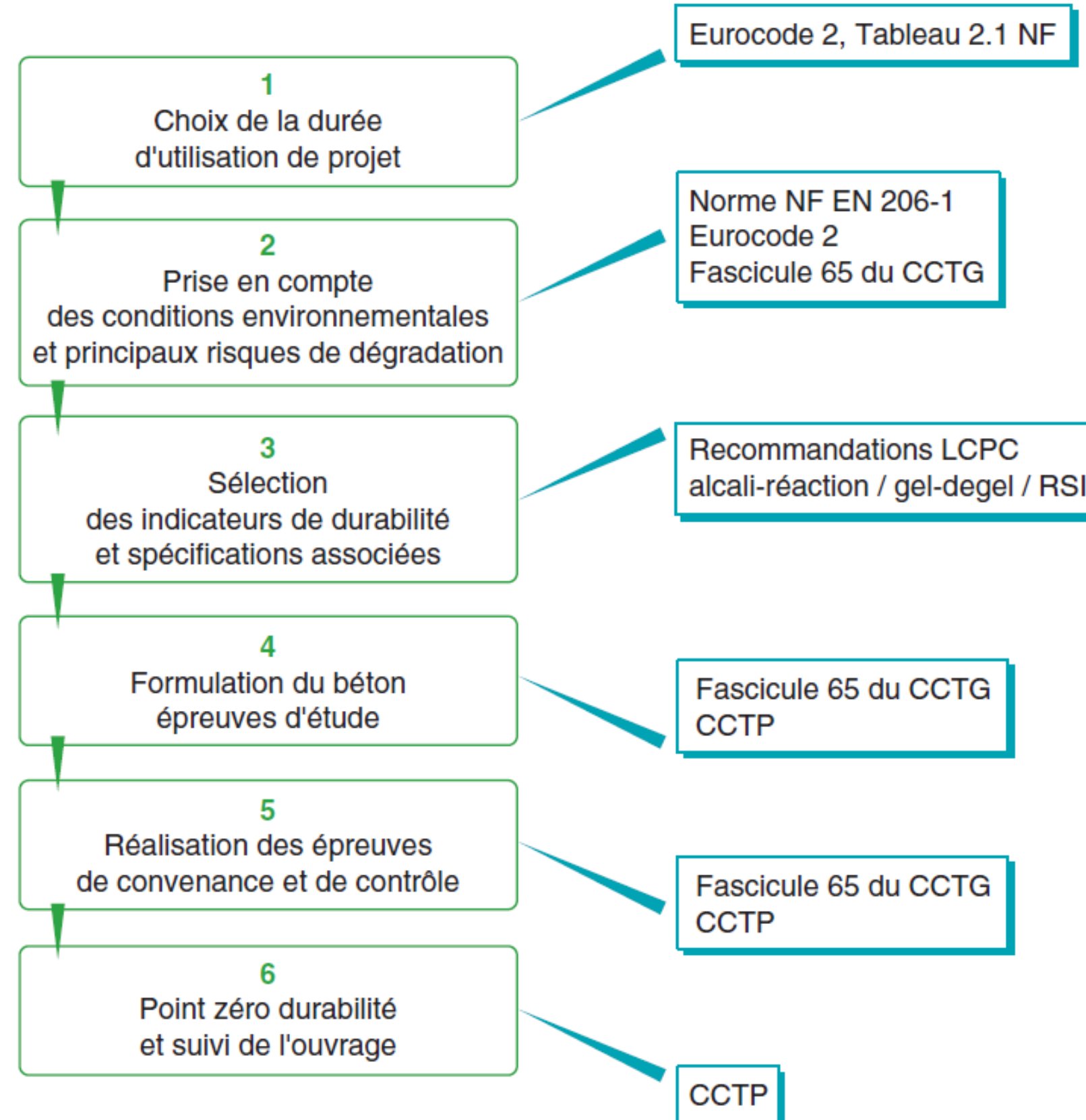
Prédiction de la durée de vie

Campagne expérimentale à La Rochelle

- Mesures expérimentales de profondeur de pénétration des chlorures
- Recalage des modèles



Synthèse



Exemple : Pont Vasco de Gamma (1998)

Première application de l'approche performantielle

Ouvrage :

16 km de long
30 m large
4 viaducs et un pont
à haubans

Exigences :

120 ans de durée de
vie
Environnement
marin agressif



1. Définition de la catégorie d'ouvrage
2. Définition des conditions environnementales
3. Définition des risques de dégradation
4. Définition de la durée de vie : $Cl^- = 0,4\%$
5. Choix des indicateurs de durabilité
6. Choix des critères d'acceptation: $10^{-17}m^2$ et $10^{-12}m^2/s$ à 28J +PM
7. Formulation et test en laboratoire de bétons : $C > 400 \text{ kg/m}^3$ et $0,33 < E/C < 0,42$
8. Validation sur bétons de centrale puis sur bétons d'ouvrage
9. Mise en œuvre d'un modèle prédictif
10. Validation du modèle à posteriori

Exemple : Pont Vasco de Gamma (1998)

Indicateurs de durabilité

- Perméabilité au gaz
- Diffusivité vis-à-vis des ions chlore.
- Indicateurs secondaires : la résistance à la pénétration des ions chlore, la porosité accessible à l'eau et la profondeur de carbonatation.

Les contrôles

- sur bétons de laboratoires issus de la formulation
- sur bétons prélevés en centrale avant coulage
- sur des carottes prélevées sur l'ouvrage lui-même.

Ces contrôles ont été complétés par des examens de la microstructure au MEB et par des mesures de la microfissuration.

Exemple : Pont Vasco de Gamma (1998)

Estimation du temps nécessaire à l'initiation de la corrosion des armatures

-Prise en compte :

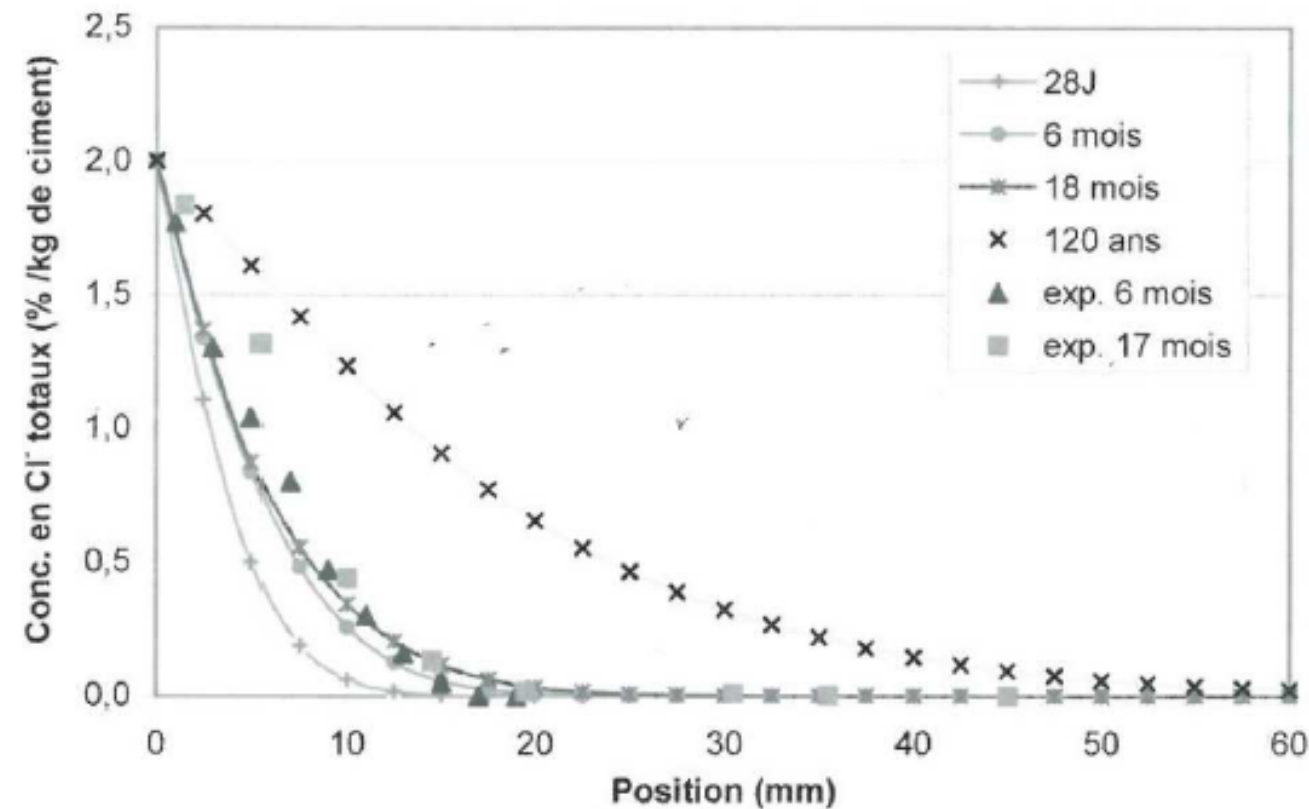
-évolution des caractéristiques du matériau en fonction de l'âge et de la profondeur

-différente valeur du coefficient de diffusion apparent des chlorures

| | avant 28 jours | de 28 jours à 6 mois | de 6 à 18 mois | de 18 mois à 3 ans |
|---|----------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| $D_{ns(mig)}$ ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) | $D^*_{1} = 6$ | $D^{**}_{2} = 1$ | $D^{**}_{3} = 0,7$ | $D^{**}_{4} = 0,5$ |

-teneur en chlorure totaux superficielle égale à 2%

Valeur critique
= 0,4%



Exemple : Nouvelle Route du Littoral – Viaduc de la Grande chaloupe - La Réunion (2017)



MAÎTRE D'OUVRAGE : La Région Réunion

MAÎTRE D'ŒUVRE : EGIS

CHIFFRES SIGNIFICATIFS :

- 6 700 m de digues
- 5 400 m de Viaduc en mer
- Viaduc de la Grande Chaloupe de 242 m (MT4)

<https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2017/04/1-1-Viaduc-de-la-Grande-Chaloupe-Approche-de-la-durabilite.pdf>

Exemple : Nouvelle Route du Littoral – Viaduc de la Grande chaloupe - La Réunion (2017)

Conditions environnementales

Climat :

- Chaud (température moyenne de 25°C)
- Humide
- Fortes intempéries

Situation géographique :

- Ambiance marine
- Zones « béton » totalement immergées
- Zones « béton » de marnage, soumises à des embruns

Durée de vie 120 ans

Utilisation des granulats locaux



Indicateurs de durabilité :

Peau : porosité accessible à l'eau en %.

Dapp : coefficient apparent de diffusion des ions chlorures en 10-12 m²/s

Kgaz : perméabilité au gaz en 10-18 m².

Kliq : perméabilité à l'eau en 10-18 m².

Spécifications complémentaires du béton

- Prévention contre l'Alcali-Réaction (AR)
- Prévention contre la Réaction Sulfatique Interne (RSI)

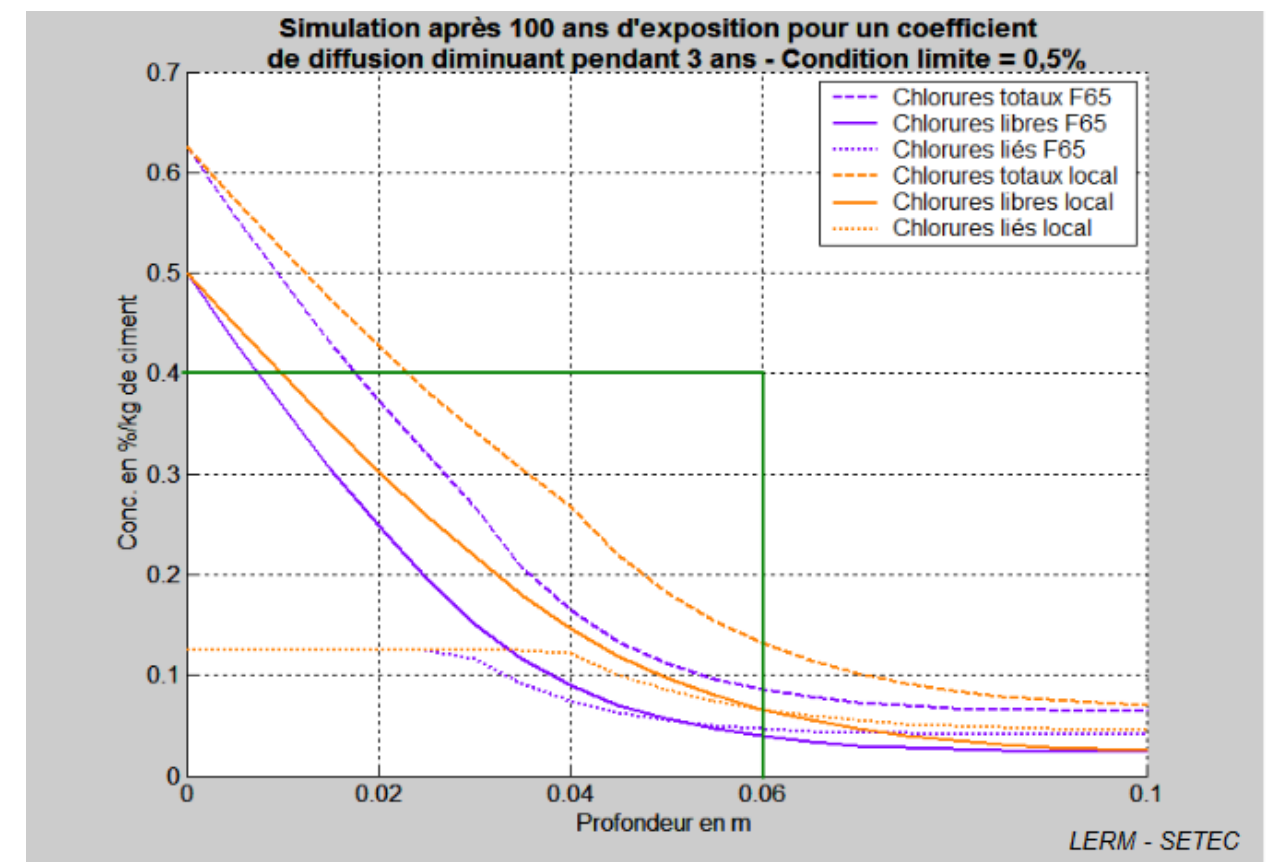
<https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2017/04/1-1-Viaduc-de-la-Grande-Chaloupe-Approche-de-la-durabilite.pdf>

Exemple : Nouvelle Route du Littoral – Viaduc de la Grande chaloupe - La Réunion (2017)

Utilisation du modèle de pénétration des chlorures du pont Vasco de Gamma :

- prise en compte des interactions chlorures/pâte de ciment
- possibilité de faire varier le coefficient de diffusion et les propriétés physico - chimiques dans le temps et dans l'espace
- effets de la température ambiante plus élevée sur l'île de la Réunion (25°C au lieu de 20°C)
- la porosité (f) plus élevée des bétons confectionnés avec les granulats locaux (20 % au lieu de 13%)

<https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2017/04/1-1-Viaduc-de-la-Grande-Chaloupe-Approche-de-la-durabilite.pdf>



Exemple :
béton du
tablier

| | F65 | La Réunion |
|--|---------|------------|
| Enrobage | 60,0 mm | |
| Profondeur où Cl ⁻ libres = 0,4 % à 100 ans | 7,5 mm | 10,0 mm |
| Protection résiduelle à 100 ans | 52,5 mm | 50,0 mm |

Exemple : Nouvelle Route du Littoral – Viaduc de la Grande chaloupe - La Réunion (2017)

- **Prévention contre l'Alcali-Réaction (AR) :**
Niveau de prévention C (guide LCPC)

Granulats locaux qualifiés non réactifs vis-à-vis de l'Alcali Réaction

- **Prévention contre la Réaction Sulfatique Interne (RSI) :**
Niveaux de prévention As, Cs et Ds (guide LCPC)

Nature des liants (relaxation possible)

Formulations validées par des laboratoires

Instrumentation et suivis thermiques en convenance et en production

Limitation de la température du béton à l'état frais

Bétonnage de nuit pour les parties les plus massives



<https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2017/04/1-1-Viaduc-de-la-Grande-Chaloupe-Approche-de-la-durabilite.pdf>

Exemple : Nouvelle Route du Littoral – Viaduc de la Grande chaloupe - La Réunion (2017)

Programme de suivi de l'ouvrage : programme de contrôle

- Porosité accessible à l'eau à 28 jours
- Essai de résistivité à 28 jours (1ère tendance)
- Perméabilité au gaz à 90 jours,
- Porosité accessible à l'eau à 90 jours,
- Coefficient apparent de diffusion des ions chlorures à 90 jours
- Mesure RCPT à 90 jours
- Eprouvettes complémentaires

| Partie d'ouvrage | Campagne d'essais de durabilité |
|---------------------------------------|--|
| Pile | • 1 par pile |
| Culée | • 1 par culée |
| Voussoirs coulés en place | • 1 fois pour les VSP (Voussoir Sur Pile) |
| | • 1 fois pour les VSC (Voussoir Sur Culée) |
| | • 2 fois pour les fléaux |
| Ames préfabriquées (voussoirs) | • 1 fois tous les 15 jours |

Tableau : extrait plan de contrôle durabilité

<https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2017/04/1-1-Viaduc-de-la-Grande-Chaloupe-Approche-de-la-durabilite.pdf>

Exemple : Nouvelle Route du Littoral – Viaduc de la Grande chaloupe - La Réunion (2017)

Programme de suivi de l'ouvrage : Contrôle extérieur (durabilité) :

- Confection des éprouvettes nécessaires par le chantier sur demande du Maître d'Oeuvre
- Laboratoire local en charge de la réalisation des essais,
- Perméabilité au gaz à 90 jours,
- Porosité accessible à l'eau à 90 jours
- Coefficient apparent de diffusion des ions chlorures à 90 jours.

Suivi :


Pendant la construction, réalisation de blocs témoins (1 m x 1 m x 0,3 m) ferrailés
un bloc sous le tablier au niveau d'une tête de pile pour des raisons d'accessibilité,
un bloc dans la zone de marnage des piles
un bloc au niveau de chaque semelle de culée

Une mesure des grandeurs suivantes sera réalisée par le Maître d'OEuvre sur les blocs témoins et sur certains éléments de l'ouvrage (prélèvement par carottage) :

1. l'enrobage des armatures,
2. la profondeur de carbonatation,
3. la détermination de la concentration en ions chlorure,
4. la porosité du béton sur carottes,
5. la détermination du pH du béton.

Opérations préalables à la réception : **point zéro** des mesures puis lors de chaque visite

Exemples de thèses



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par Université Toulouse III Paul Sabatier
Discipline ou spécialité : Génie Civil

Présentée et soutenue par

Ilgar ALLAHYARI

Le 20 mai 2016

Titre :

Approche performantielle des bétons :
Vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité

JURY

Mourad BEHIM, Pr. Université d'Annaba (Rapporteur)
Abdelhafid KHELIDJ, Pr. Université de Nantes (Rapporteur)
Jonathan MAI NHU, Docteur. Cerib (Examinateur)
Fabien BARBERON, Docteur. Bouygues Travaux Publics (Examinateur)
Gilles ESCADEILLAS, Pr. Université Toulouse III (Président du Jury)
Marie-Pierre CUBAYNES, Mef. Université Toulouse III (Co-encadrant de thèse)
Franck CASSAGNABERE, Mef. Université Toulouse III (Co-encadrant de thèse)
Myriam CARCASSES, Pr. Université Toulouse III (Directrice de thèse)

Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGeP)
Unité de recherche : Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)
Directeur(s) de Thèse : Myriam CARCASSES

→ Comparer les propriétés physico-chimiques de bétons à forte teneur en addition minérale (filler calcaire, cendre volante, laitier de haut fourneau et métakaolin), dérogeant à l'approche prescriptive avec celles des bétons de référence répondant à cette même norme.

→ Cette comparaison s'est effectuée au travers d'indicateurs de durabilité généraux (porosité accessible à l'eau, perméabilité à l'oxygène, coefficient de migration des ions chlorure et teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$) et d'indicateurs spécifiques : la résistance à la carbonatation naturelle et accélérée.

Exemples de thèses



La Rochelle Université

École Doctorale EUCLIDE

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement

Thèse présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA ROCHELLE UNIVERSITÉ

Spécialité : Génie Civil

Présentée par :

Anass EL FARISSI

SUJET DE THESE

Prédiction de la durée d'utilisation des ouvrages en béton armé par une approche performantielle dans le cas de la corrosion induite par la carbonatation ou l'attaque des ions chlorure

Thèse soutenue le 30 Juin 2020

Composition du jury

| | | |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Rapporteurs | M. Emmanuel ROZIERE | MCF-HDR, Ecole Centrale de Nantes |
| | M. Othman OMIKRINE-METALSSI | CR-HDR, Université Gustave Eiffel |
| Examineurs | Mme. Myriam CARCASSES | PR, Université de Toulouse |
| | M. Ouzali AMIRI | PR, Université de Nantes |
| Directeur de thèse | M. Adbelkarim AÏT-MOKHTAR | PR, La Rochelle Université |
| Co-encadrant | M. Philippe TURCRY | MCF, La Rochelle Université |
| Invités | M. François CUSSIGH | ING, Vinci Construction France |
| | M. Akhi YOUNSI | MCF, La Rochelle Université |

→ Développer des modèles utilisables par l'ingénieur dans une démarche d'approche performantielle pour la prédiction de la durée d'utilisation des ouvrages en béton armé soumis à l'attaque par les ions chlorure ou la carbonatation, suite à l'amorçage et au développement de la corrosion en leur sein.

Trois modèles :

- un modèle de transfert des ions chlorure
- un modèle de carbonatation
- un modèle de corrosion

Objectif : Estimer la durée d'initiation et la durée de propagation de corrosion en prenant en compte les facteurs liés au matériau (i.e. indicateurs de durabilité), à la mise en œuvre, à l'environnement et à la géométrie.

Des questions ?

Sources

Cours Durabilité des bétons – Master DMS – ENPC

Cours Approche Performantielle – Aveline Darquennes – ENS Cachan

NF EN 206+A2
MARS 2021



Cahier des clauses techniques générales
applicables aux marchés publics
de travaux de génie civil

Fascicule N°65

EXECUTION DES OUVRAGES DE GENIE CIVIL
EN BETON

Version 1.0 - Décembre 2017

Fascicule 65

1/171



Groupe de travail
"Conception des bétons pour une durée de vie donnée des
ouvrages - Indicateurs de durabilité"

Documents scientifiques et techniques

CONCEPTION DES BÉTONS POUR UNE
DURÉE DE VIE DONNÉE DES
OUVRAGES
Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion
des armatures et de l'alcali-réaction

Etat de l'art
et

Guide pour la mise en œuvre d'une approche
performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs
de durabilité

Juillet 2004

normalisation
française

ISSN 0335-3931

FD P 18-480
Octobre 2022

Indice de classement : P 18-480

ICS : 91.100.30

Béton — Justification de la durabilité des ouvrages
en béton par méthode performantielle

E : Concrete — Performance-based method for justifying concrete structures
durability
D : Beton — Rechtfertigung der Nachhaltigkeit von Betonbauwerken durch
leistungsorientierte Methode

Fascicule de documentation

publié par AFNOR en octobre 2022.

Correspondance A 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 définit la méthodologie de justification performantielle associée
à une formule de béton donnée. Les modifications par rapport à la composition ayant
fait l'objet des divers essais performantiels ne sont pas admises à l'exception de
celles concernant les adjuvants, relatives aux adaptations saisonnières, sous
réserve qu'elles aient été qualifiées.

Descripteurs Thésaurus International Technique : béton, formule chimique, composition,
durabilité, autorisation de fabrication, document technique, qualité, processus,
contrôle de qualité, performance, caractéristique, qualification, essai, grandeur,
laboratoire d'essais.



techniques et méthodes
des laboratoires des ponts et chaussées

