

Technologie du béton – GCI 340

Ammar Yahia, ing., Ph.D.
Génie civil

Automne 2011

CHAPITRE 8 :

DURABILITÉ DU BÉTON

Plan:

1. Durabilité
2. Relation entre porosité et perméabilité
3. Effet de la perméabilité sur la dégradation du béton
4. Durabilité du béton aux cycles de gel-dégel
5. Réaction alcalis-granulats et son effet sur la durabilité
6. Corrosion

Durabilité

- **Durabilité = aptitude du béton à résister à la détérioration provenant de son environnement**
- **Durabilité est un fait reconnu est attesté par la pérennité des ouvrages exposés à des conditions climatiques**
- **Les ouvrages (plates formes en milieu marin, autoroutes sous un trafic intenses, viaducs soumis à l'action de gel, etc.) résistent aux multiples agressions physico-chimiques**

Durabilité

- **Des défauts de conception, de mise en œuvre ou des causes accidentelle soient à l'origine de désordre**
- **La notion de durabilité est donc indissociable de celle de la qualité à tous les niveaux et, en particulier, de celle du béton**
- **La qualité du béton est un facteur d'économie par sa contribution à la limitation des coûts de maintenance**

Durabilité

**Durabilité se traduit par la conformité
aux normes selon les conditions
d'exposition**

Facteurs qui affectent la durabilité

1. Facteurs propres au matériau béton

- * **La porosité du béton (porosité capillaires, porosité hydrates)**
 - **Réduction de la porosité dépend de la conception et la mise en œuvre du béton: a. dosage en ciment adéquat, b) une faible teneur en eau, c) une granulométrie optimale**
- * **La fissuration (les fissures bien maîtrisées par les armatures ou joints en limitant l'ouverture n'ont pas d'influence**

Facteurs qui affectent la durabilité

1. Facteurs propres au matériau béton

- La réglementation, notamment en matière de béton armé, prévoit le dimensionnement des ouvrages et les dispositions propices à empêcher ou à contrôler efficacement la fissuration potentielle.
- Seules, les fissures non contrôlées sont susceptible de jouer un rôle négatif
- Causes: retrait de la pâte de ciment, conditions thermiques et hydrométriques, causes mécaniques.

Facteurs qui affectent la durabilité

1. Facteurs propres au matériau béton

- * **La corrosion des armatures – dans des conditions normales, les armatures sont protégées de la corrosion par un phénomène de passivation (création à la surface du métal d'une pellicule de ferrite Fe_2O_3 CaO - Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer (la présence la chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures)**

Facteurs qui affectent la durabilité

1. Facteurs propres au matériau béton

- Plusieurs agents peuvent neutraliser cette protection: le gaz carbonique, les chlorures, les sulfates
- La grande rapidité d'action de ces divers agents est en relation directe avec la porosité du béton et avec la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou de liquides agressifs
- Parmi les actions susceptibles de modifier le béton d'enrobage = carbonatation

1. Facteurs propres au matériau béton



- le milieu basique (ph 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9 n'assurant plus la protection des armatures

* La réaction alcalis-granulats: ce phénomène ne peut intervenir que si plusieurs conditions sont remplies = utilisation de granulats réactifs, envor. Humide, une teneur en alcalis élevée, béton insuffisamment compact

Facteurs qui affectent la durabilité

2. Les facteurs externes

- * **L'environnement d'exposition et de service**
 - **les acides, certaines salines ou même des solutions basiques peuvent entraîner la dissolution de la chaux et la formation des composés solubles**
 - **Les eaux souterraines sulfatées constituent un cas d'agression bien connu: le sulfate de calcium se combine avec les aluminates du ciment pour former un sel, l'étringite. Dont la cristallisation provoque une expansion**

Facteurs qui affectent la durabilité

2. Les facteurs externes

- ceci cause de la fissuration – pénétration des agents agressifs.

*** Conditions hivernales – cycles de gel-dégel, séchage-mouillage, sel de déverglaçage.**

Mécanismes:

a. accroissement des pressions dans les capillaires, dû au mouvement de l'eau vers les fronts de gel d'eau interne

b. refroidissement plus rapide – choc thermique

Structure de la pâte de ciment

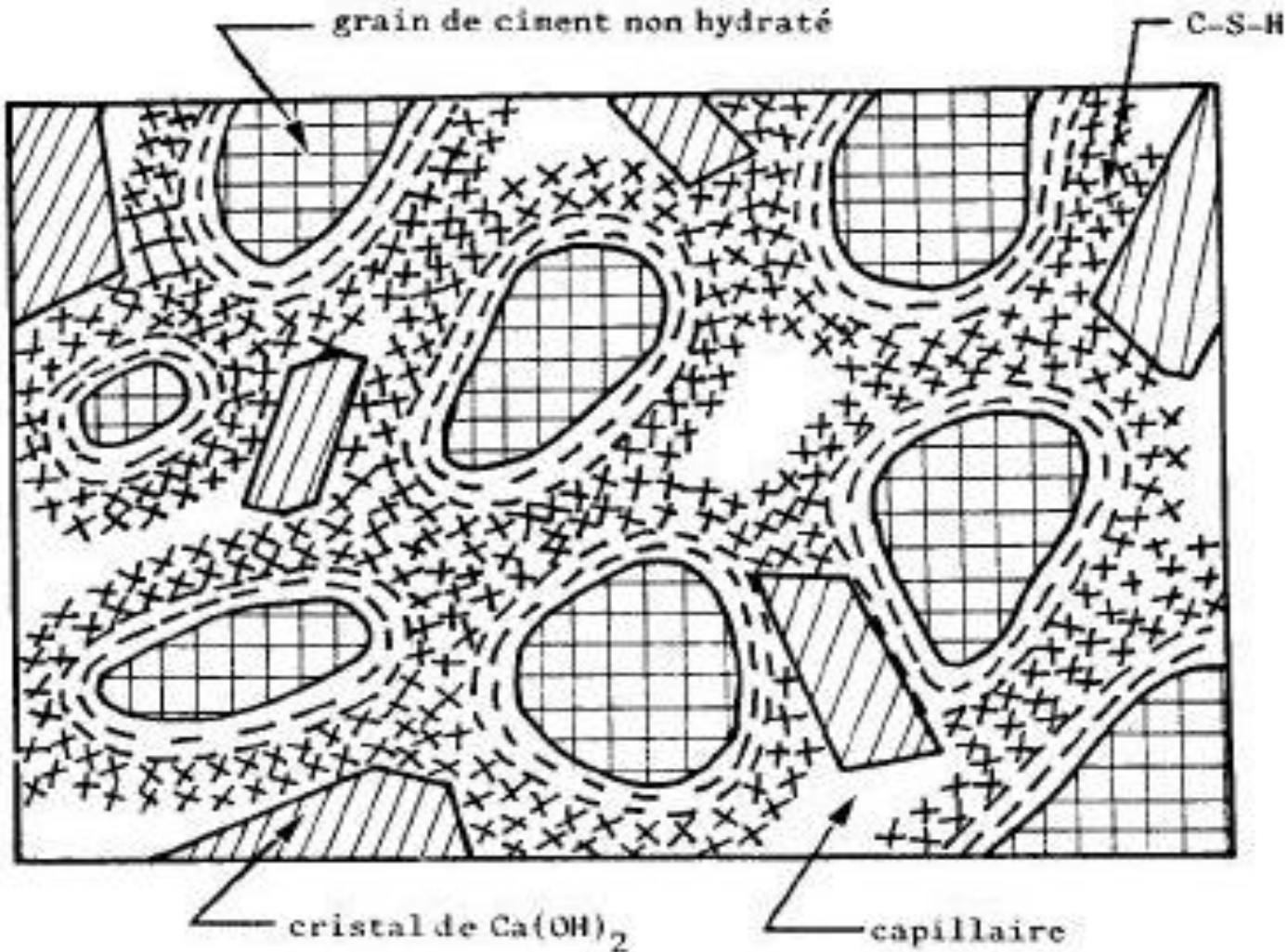
- Pour bien comprendre les propriétés physico chimiques du béton, il est donc important de comprendre la structure de base de la pâte de ciment hydraté.
- Plusieurs aspects de la durabilité du béton sont directement liés aux caractéristiques de la pâte de ciment durci.
- Le béton durci est le résultat de l'hydratation du ciment Portland qui produit des C-S-H (silicates de calcium hydratés).
- Les C-S-H sont responsable de développement des résistances.

Structure de la pâte de ciment

- **La pâte de ciment représente de 25% à 40% du volume du béton. Elle est formée par:**
 - * **Les hydrates (C-S-H, Ca(OH)_2 , sulfoaluminates)**
 - * **Des grains de ciment non-hydraté**
 - * **Des espaces capillaires**
 - * **Des bulles d'air**
- **Des grains de ciment partiellement hydratés et recouverts d'une couche d'hydrates = capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau**

Structure de la pâte de ciment

- Représentation schématique [Pigeon 1981]



Structure de la pâte de ciment

- Les C-S-H et de la chaux remplissent graduellement les espaces entre les grains de ciment
- Les pores de gel ne sont pas représentés et les bulles d'air sont trop grandes pour apparaître sur cette figure.
- Les principaux hydrates: Les C-S-H, Les aluminates hydratés, La chaux hydratée (portlandite), Des impuretés.

Structure de la pâte de ciment

- Les C-S-H occupent entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Le CSH est un gel solide qui a les propriétés d'un corps solide.

Structure de la pâte de ciment

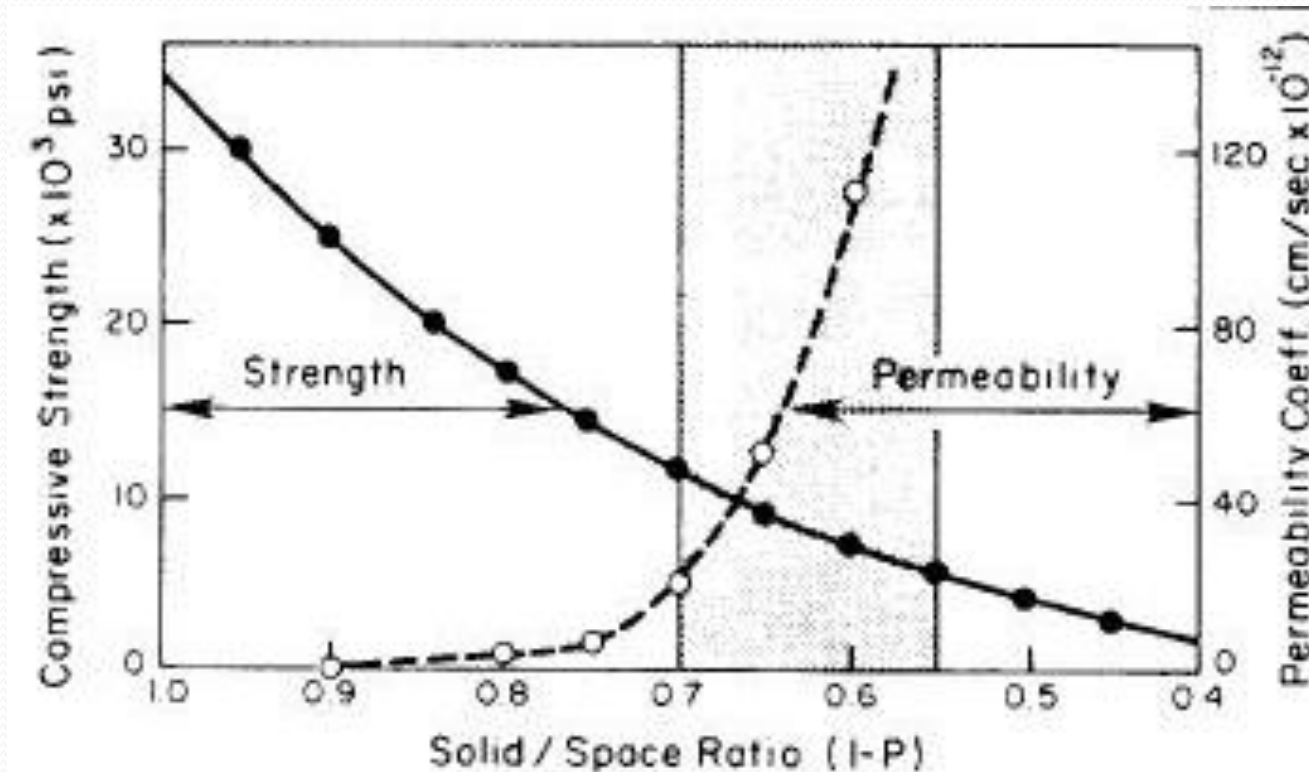
- **Le gel de C-S-H est poreux (28%) et ces pores sont remplis d'eau**
- **L'eau des pores de gel n'est pas "libre" car elle est fortement retenue sur les feuillettes par des forces de surface**
- **Ces pores de gel sont extrêmement fins, ils contribuent très peu à la perméabilité de la pâte et du béton**

Structure de la pâte de ciment

- La portlandite occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée.
- La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique et elle devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5.
- La porosité interne du béton et de la pâte de ciment hydraté gouverne de nombreuses propriétés du béton: caractéristiques mécaniques, les perméabilités (eau, ions , gaz)

Structure de la pâte de ciment

- Porosité diminue = propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue



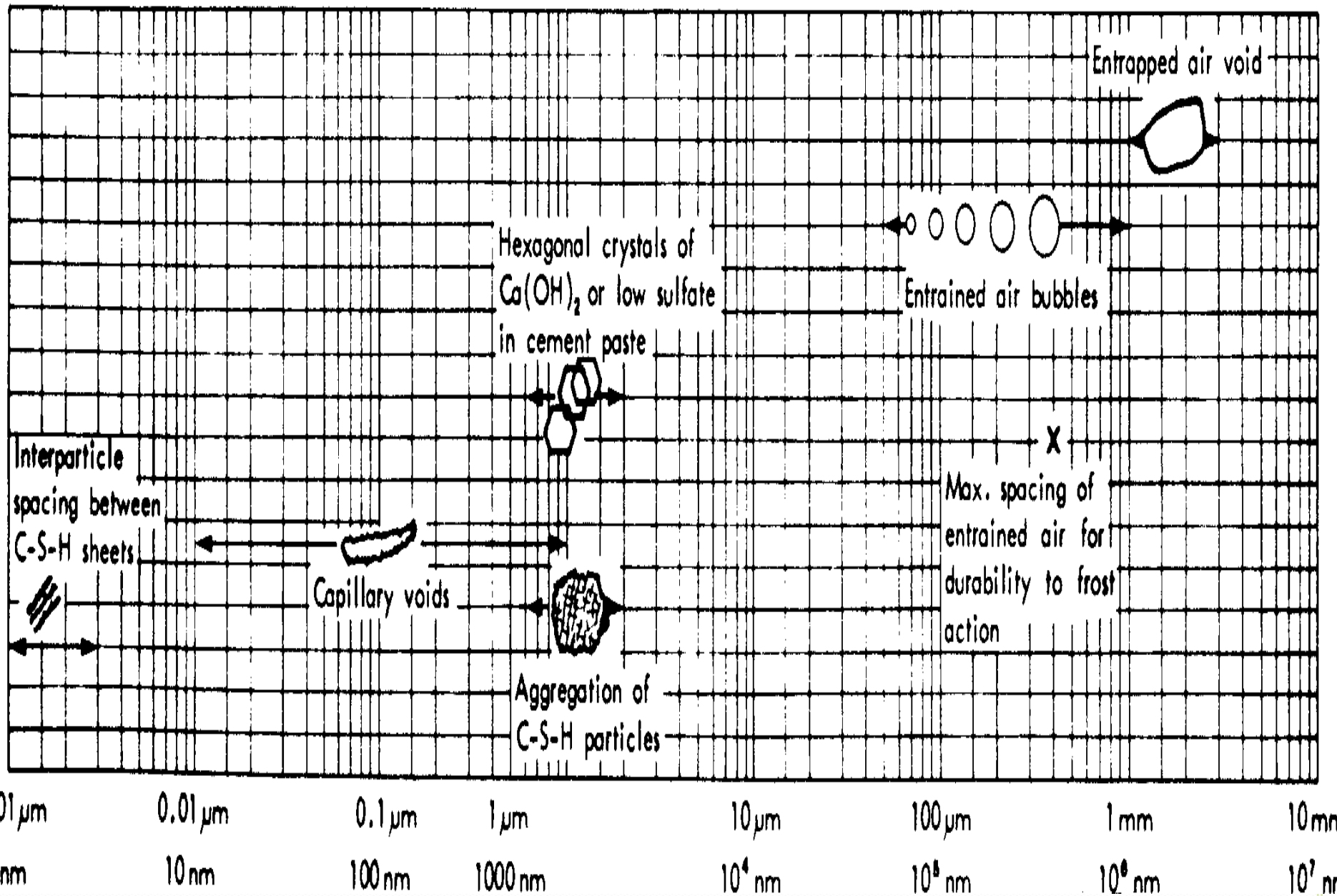
Mehta 1986

Structure de la pâte de ciment

- La porosité du béton est constituée de plusieurs familles de vides
- Les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'angström (Å).

Sur une échelle de 1 à 1000 000:

Les plus petits vides du béton sont de 1 million de fois plus petits que les plus gros



Vides dans la pâte de ciment

- Les vides d'air entrappés et les défauts de compaction (diamètre $> 1\text{mm}$) -- généralement pas remplis d'eau
- Les bulles d'air entraînées ($10\ \mu\text{m} < \text{diamètre} < 1\ \text{mm}$)
- Les pores capillaires ($0,01\ \mu\text{m} < \text{diamètre} < 5\ \mu\text{m}$)
Béton conservé à l'humidité = pores remplis d'eau
Séchage du béton = pores commencent à se vider
graduellement, les plus gros en premier

Vides dans la pâte de ciment

- Les vides d'air entrappés et les défauts de compaction (diamètre $> 1\text{mm}$) -- généralement pas remplis d'eau
- Les bulles d'air entraînées ($10\ \mu\text{m} < \text{diamètre} < 1\text{mm}$)
- Les pores capillaires ($0,01\ \mu\text{m} < \text{diamètre} < 5\ \mu\text{m}$)
Béton conservé à l'humidité = pores remplis d'eau
Séchage du béton = pores commencent à se vider graduellement, les plus gros en premier
- Perméabilité = f(volume total, dimension des pores capillaires)

Vides dans la pâte de ciment

- Facteurs influents sur la porosité:
 - * E/C -- gouverne directement l'espacement initial entre les particules de ciment dans la matrice
- Porosité capillaire:
 - * E/C élevé = plus d'eau nécessaire pour l'hydratation, donc eau libre!! Aussi, les particules de ciment sont éloignées les unes des autres → une grande porosité capillaire
 - * E/C faible = un système compact et toute l'eau pourra réagir avec le ciment → faible porosité capillaire

Vides dans la pâte de ciment

- * Il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles pour assurer un degré d'interconnexion plus faible = une faible perméabilité

Eau dans la pâte de ciment

- Dans la pâte de ciment hydraté, l'eau se trouve sous différentes formes et en fonction de son état (et de son localisation!!), cette eau influencera la durabilité

A) L'eau combinée chimiquement (densité 1,2) -- fait partie intégrante des C-S-H. Elle représente 23% du poids de ciment qui a réagi. Elle est très stable et on ne peut l'évaporer qu'à une haute temp.

B) L'eau zéolitique (entre couche) (densité 1,0)

Eau dans la pâte de ciment

B) L'eau zéolitique (entre couche) (densité 1,0)

- Elle n'est pas chimiquement combinée dans la structure des C-SH
- Elle est retenue entre les feuillets de C-S-H par des liens hydrogène (évaporation quand le taux d'humidité $< 30\%$ = retrait important)

C) L'eau adsorbée (densité 1,0)

- Cette eau est physiquement liée sur la surface des solides (paroi capillaire et pores de gel)

Eau dans la pâte de ciment

- Une grande partie de l'eau adsorbée peut être retirée si le taux d'humidité $< 50\%$ (cette perte d'eau est responsable du retrait du béton)

D) L'eau des capillaires -- eau en surplus qui n'a pas pu réagir avec le ciment. L'eau libre est contenue dans les plus gros capillaires ($> 0,05 \mu\text{m}$). Le départ de cette eau ne cause pas de changement de volume important (retrait).

Formation de la glace dans le béton

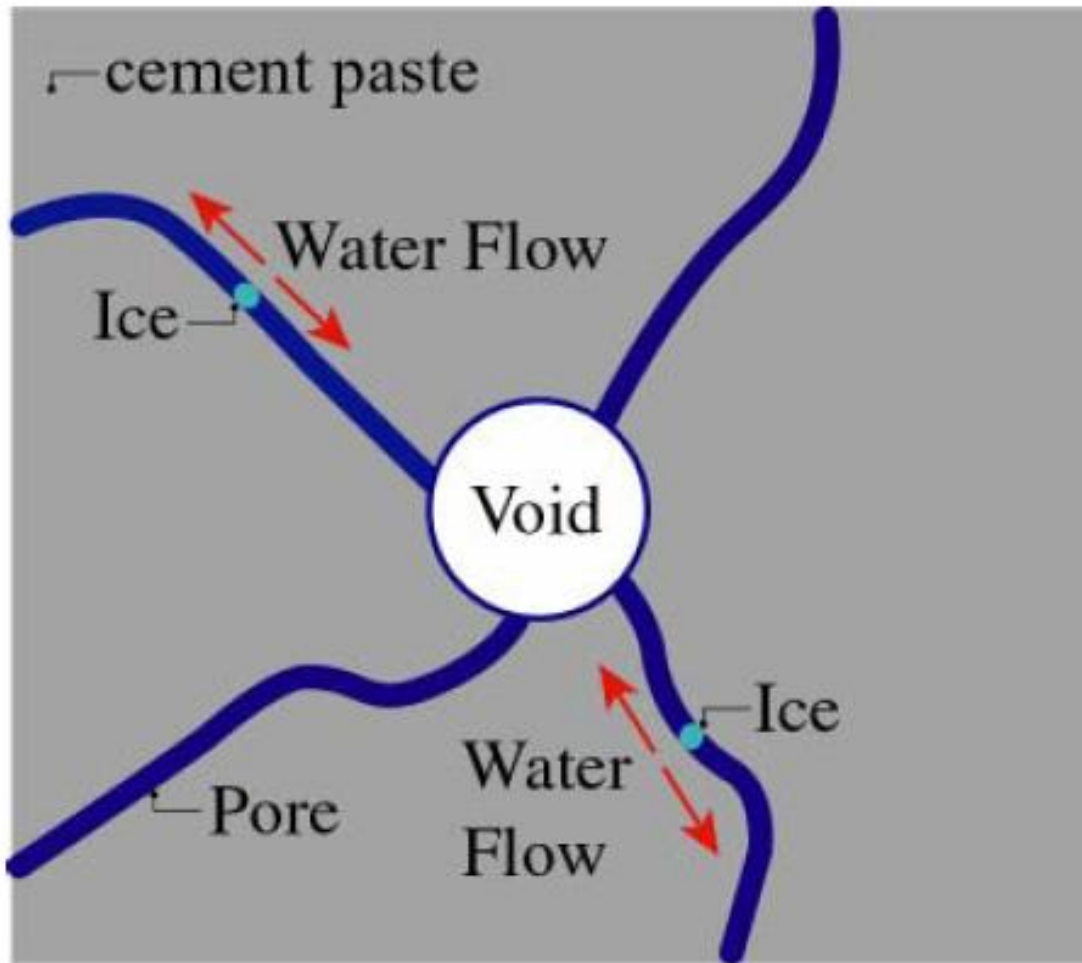
- Lorsque la température s'abaisse au-dessous de 0°C – une partie de l'eau contenue dans la pâte de ciment hydraté se transforme en glace
- Ce processus est graduel et fonction de:
 - dimension de pores
 - gradient de température (ou vitesse de refroidissement)
 - pores plus fins = température plus basse pour transformer l'eau en glace.
 - Par exemple: l'eau des pores de gel gèle à une température inférieure à -78°C .

Conclusion:

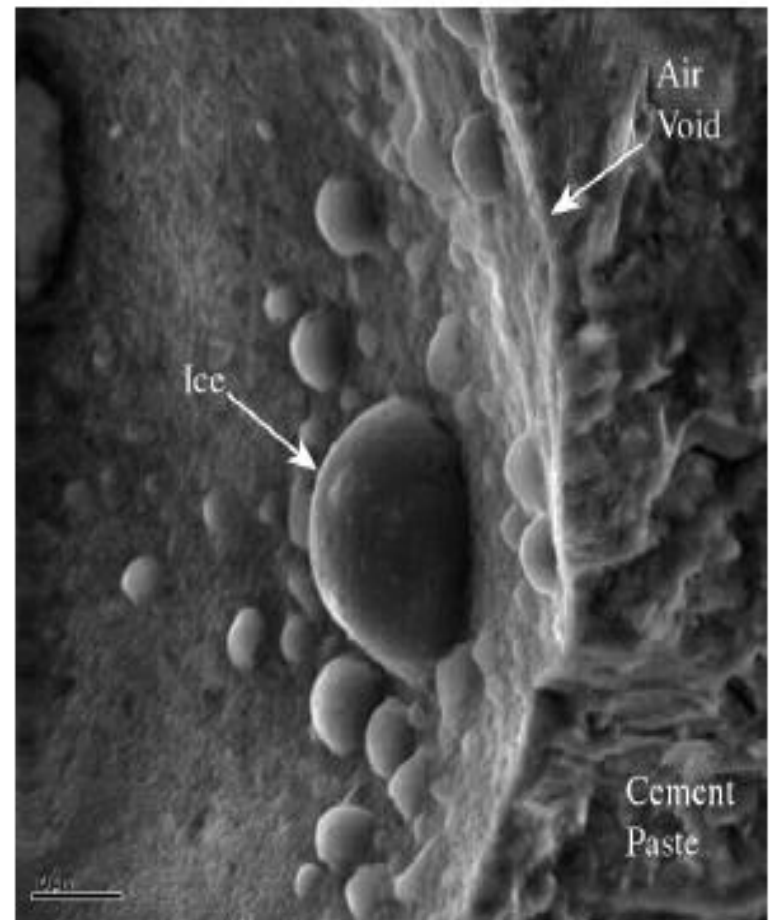
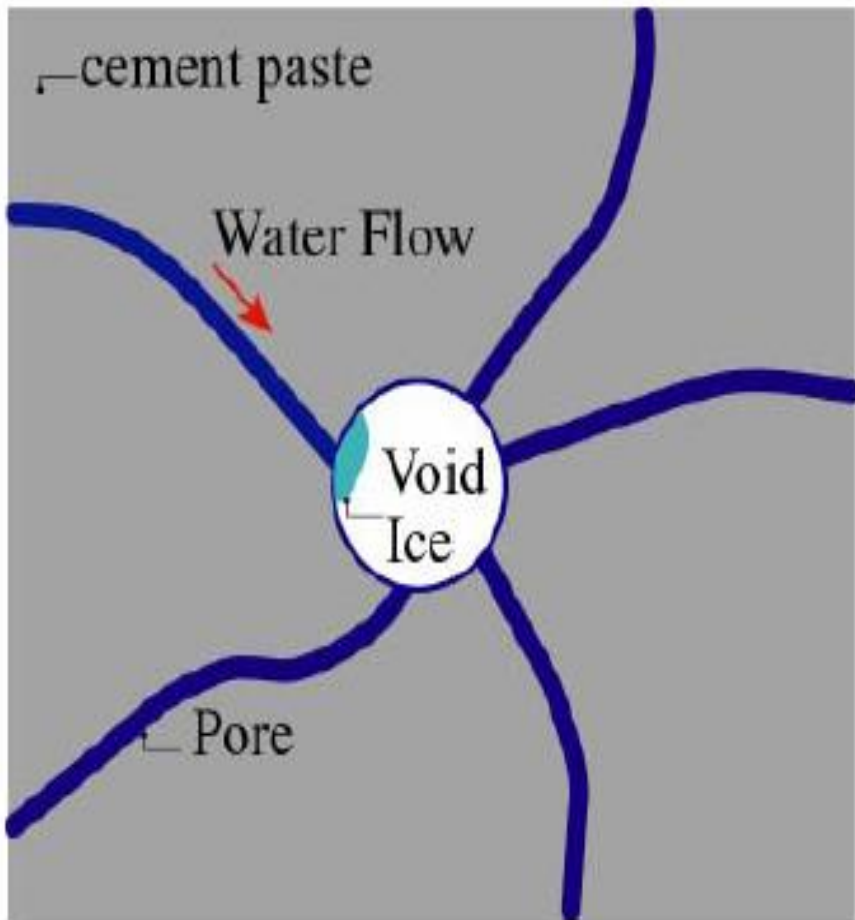
- Pratiquement, pour un béton exposé aux cycle de gel-dégel, il est plus avantageux d'avoir une porosité capillaire la plus faible et la plus fine possible pour diminuer la quantité de glace
- Moyens:
 1. Utiliser dans la limite du possible, un rapport E/C faible
 2. Mûrissement adéquats
 3. Période de mûrissement suffisante = former assez d'hydrate et raffine la porosité capillaire.

Pourquoi de l'air dans le béton?

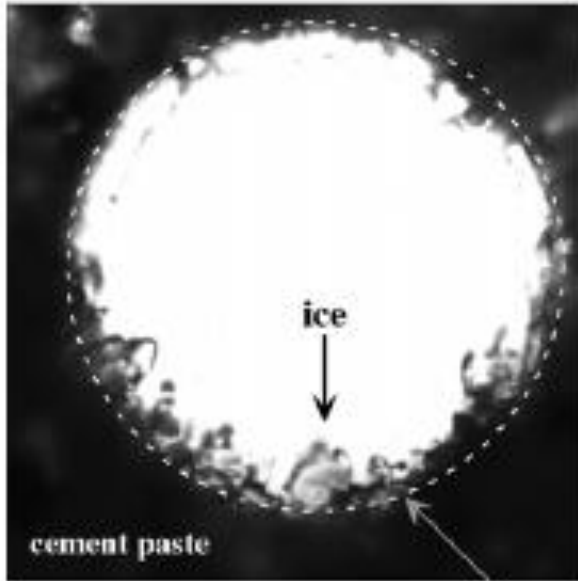
- **Améliore la résistance aux cycles de gel-dégel**
- **Améliore la maniabilité**
- **Réduit la risque de sédimentation et ressuage**



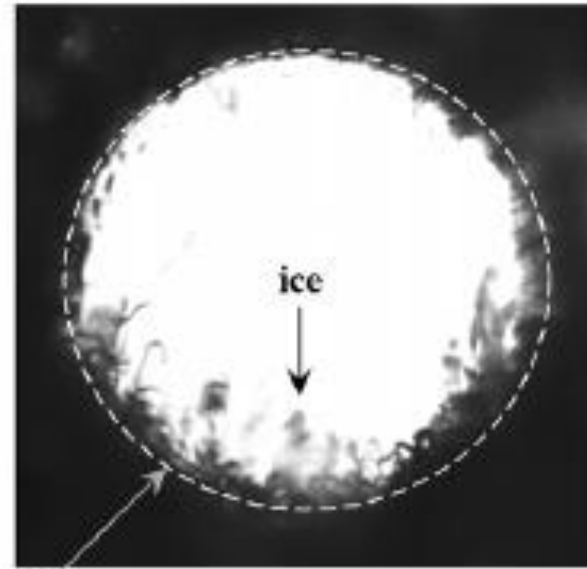
Monteiro



Monteiro



(a) 5 minutes



(b) 15 minutes

average cross section of the air void
during the freezing process

Monteiro

Les cycles de gel-dégel

- **L'action des cycles de gel-dégel produit: fissuration interne et écaillage des surfaces**
- **Ces 2 types de dégradation ont 2 processus différents et surviennent à différents périodes**

1. Fissuration interne

- **Fissuration interne intense – touche toute la masse du béton**
- **Béton non protégé – cette fissuration dépend du nombre de cycles gel-dégel, temps d'exposition, sévérité des cycles (Δt), taux de saturation du béton**
- **Réduction des propriétés mécaniques**
- **Augmentation de la perméabilité**

2. L'écaillage de surface

- **Mode de dégradation qui touche surtout la surface du béton exposée -- décollement progressif de particules de pâte**
- **Présence des sels fondants**

Mécanismes

- **Dans des pâtes sans air entraîné – un gonflement à des température $< -5^{\circ}\text{C}$**
- **Dans une pâte à air entraîné – contraction due à la formation de la glace dans les bulles d'air (sans créer de la pression interne)**

Degré de saturation critique

- Il y a un mouvement d'eau pour quitter les pores capillaires vers les bulles d'air (partiellement remplies d'eau) où l'eau gèle
- Dans un béton sec -- pas de mouvement d'eau, donc moins de désordre
- Dans le cas d'un refroidissement lent – pour un taux de saturation $< 90\%$, les vides non complètement saturés constituent un espace de décompression

Théorie de Power

- **Si l'eau gèle dans un pore capillaries, le volume devient insuffisant pour accommoder toute l'eau, donc la partie en excès sera expulsée**
- **Développement d'une pression hydraulique fonction de la résistance à l'écoulement de l'eau**
Elle est fonction:
 - * **la longueur du trajectoire (L_{max}),**
 - * **la perméabilité de la pâte,**
 - * **la disponibilité d'un vide**

Théorie de Pression osmotique (Power & Helmuth)

- **Comment explique-t-on la contraction?**
- **Est-ce que l'eau est réellement expulsée? ou tout simplement dirigée vers les sites de formation de glace?**
- **Ils ont observé que le point de congélation de l'eau diminue avec la taille des pores!! ou c'est parce que l'eau n'est pas pure?**
- **Aussi, il y a un déséquilibre entre la solution concentrée et la solution moins concentrée, c'est le phénomène d'OSMOSE!**
- **L'eau concentrée essaye de passer des petits pores vers les plus gros (pour avoir un équilibre)**

Attaques aux SULFATES

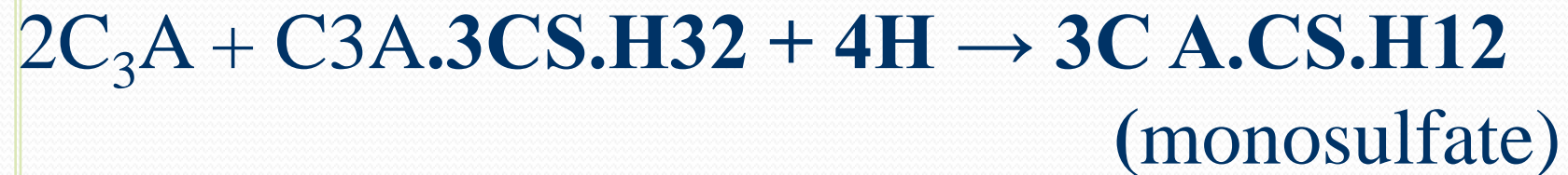
Origine du problème

- La plupart des sols contiennent des sulfates sous forme de gypse (typiquement entre 0.01 to 0.05% exprimé sous forme de SO_4) – cette quantité n'est pas néfaste sur la durabilité du béton
- Teneurs élevées des sulfates dans les eaux souterraines proviennent de la présence du magnésium et des sulfates alcalin.

Origine du problème

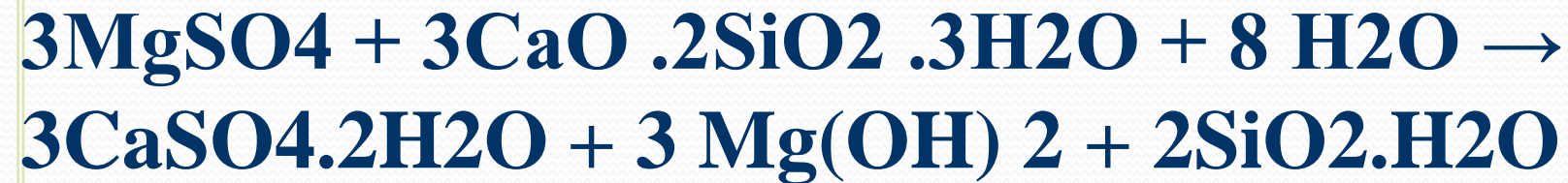
- **Béton fissuré = Perméabilité↑ et les agents pénètrent plus facilement, ce qui accélèrent le processus de détérioration**
- **L'expansion = problèmes structuraux**
- **Attaque aux sulfates peut prendre la forme d'une perte progressive de la résistance et de la masse**

Formation de l'ettringite et du monosulfate



En présence des sulfates, le monosulfate réagit avec les sulfates pour former de l'ettringite, ce qui cause de l'expansion

Magnésium de sulfate



Comment contrôler l'attaque aux sulfates?

- **La qualité du béton = faible perméabilité**
- **Bon recouvrement,**
- **Dosage en ciment approprié,
faible E/C,**
- **Bonne consolidation du béton**

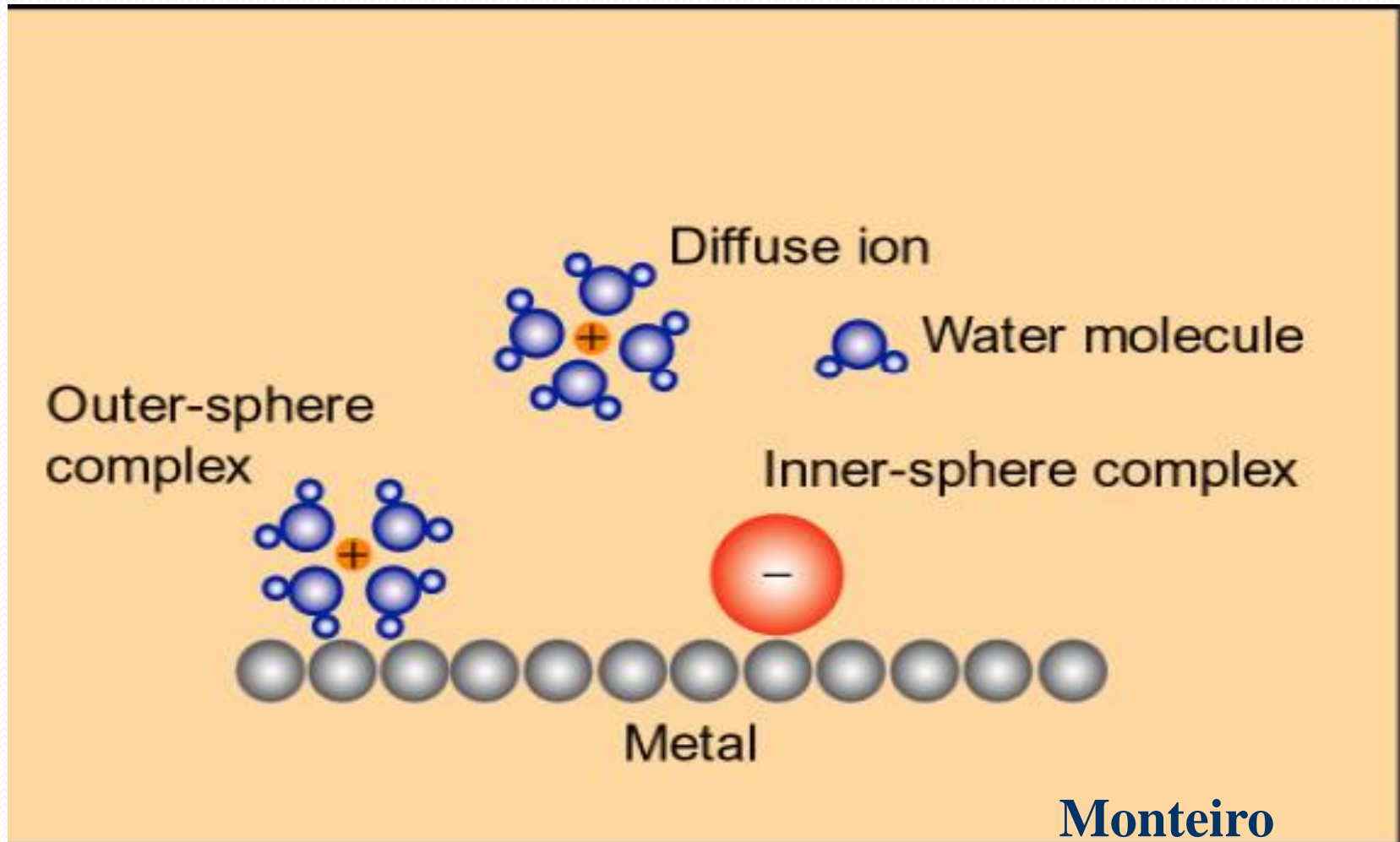
ACI Building Code 318

- **Attaque négligeable lorsque la teneur en sulfate < 0.1% dans le sol, ou < 150 ppm (mg/liter) dans l'eau**
→ pas de restriction pour le type de ciment, E/C
- **Attaque modérée = quant la teneur en sulfates est entre 0.1 et 0.2% dans le soils ou bien de 150 à 1500 ppm dans l'eau**
→ Type de ciment, pouzzolanes, ciment au laitier, E/C < 0.50 pour béton normal

ACI Building Code 318

- **Attaque sévère = entre 0.2 et 2% dans les sols ou 1500 to 10,000 ppm dans l'eau**
→ **Type de ciment, $E/C < 0.45$**
- **Attaque très sévère = $> 2\%$ dans les sols et $> 10,000$ ppm dans l'eau**
→ **Type de ciment, pouzzolanes, ciment au laitier, $E/C < 0.45$**

La corrosion (+ document lecture, site WEB)

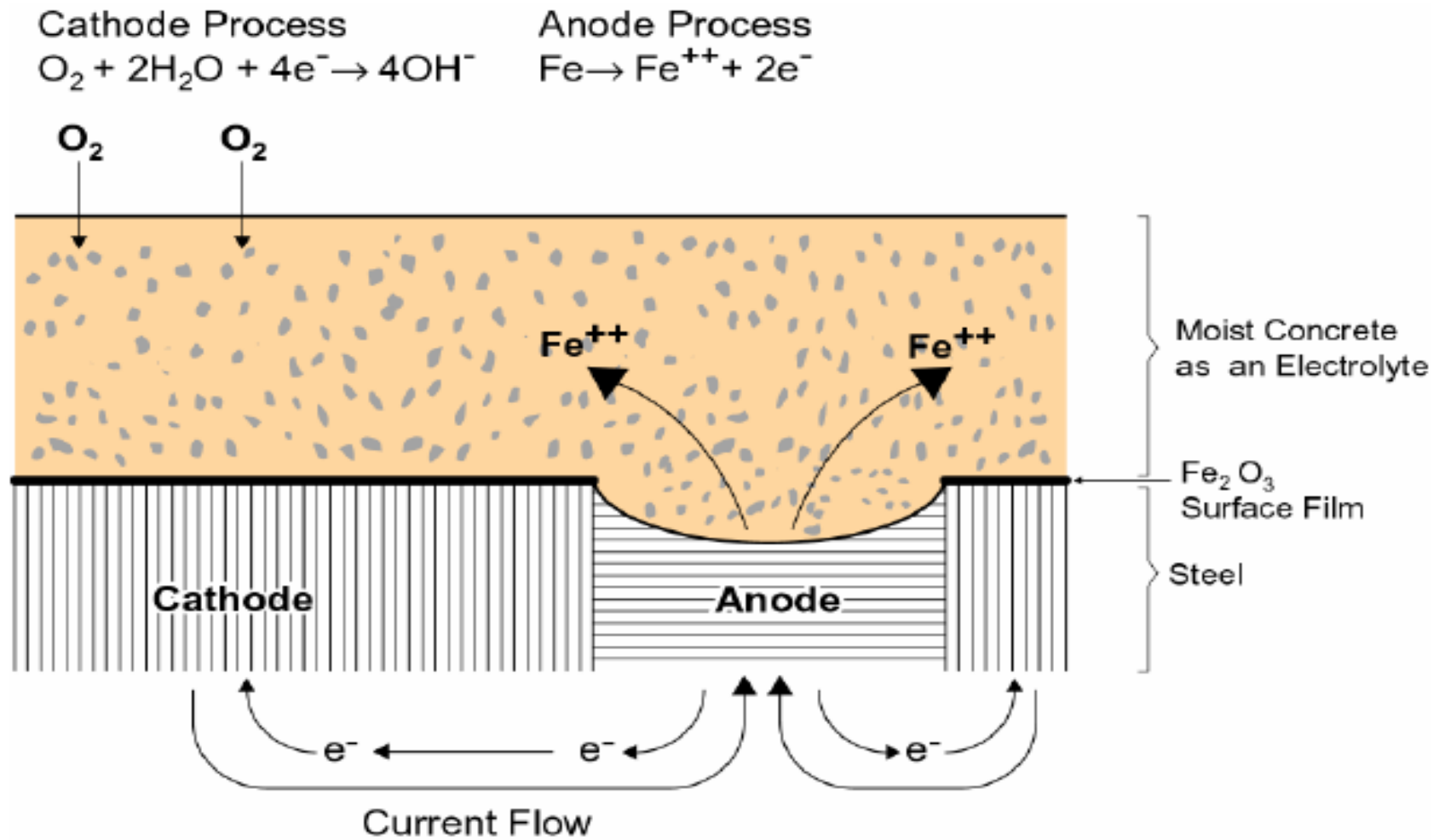


La corrosion



Monteiro

La corrosion



Monteiro

La corrosion

