

LA DURABILITE DES BETONS

Introduction – mécanismes de dégradation

S. Rémond

Objectifs des 3 séances

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

Définitions de la durabilité

ACI committee 201 définit la durabilité de la manière suivante:

“... the ability to resist weathering action, chemical attack, abrasion, or any other process of deterioration. Durable concrete will retain its original **form**, **quality**, and **serviceability** when exposed to its **environment**”.

D'après J. Baron dans “la durabilité des bétons” (1992) :

“ Si l'on définit la qualité comme “l'aptitude à satisfaire les besoins des utilisateurs”, la durabilité est le **maintien** de cette qualité au cours du **temps**”.

Durabilité & développement durable

Les bâtiments, les ouvrages d'arts, les routes représentent un patrimoine de plusieurs centaines de milliards d'euros ... La durabilité de ces derniers est très importante d'un point de vue du **développement durable** :

Les exigences de durabilité induisent un surcoût à la réalisation mais ce dernier est bien moindre vis à vis du coût engendré par les réparations et l'immobilisation de la structure.

Pour cette raison l'expertise en durabilité est une composante importante du secteur du Génie Civil aussi bien dans la conception des ouvrages, que dans leur suivi au cours du temps (inspection par la DDE par exemple avec **méthodes d'auscultation non destructives**) et leur éventuelle réparation.

Durabilité & développement durable

Importance du contrôle des ouvrages : cas des ponts routiers

Familles d'ouvrages	Âge moyen des ponts	Âge moyen des ponts démolis
Béton armé	26 ans	51 ans
Béton précontraint	27 ans	31 ans
Maçonnerie	124 ans	84 ans
Métal	34 ans	82 ans

Tableau 2 : âge moyen par famille d'ouvrages des ouvrages en service et des ouvrages démolis

Durabilité & développement durable

Importance du contrôle des ouvrages : cas des ponts routiers



Photo n° 13 : stalactites actives provenant de la dissolution du mortier des joints entre pierres d'un pont en maçonnerie, par défaut ou absence d'étanchéité favorisant le cheminement de l'eau à travers l'ouvrage – Source : RST

Durabilité & développement durable

Importance du contrôle des ouvrages : cas des ponts routiers



Photo n° 14 : efflorescences et coulures d'eau de couleur rouille, en extrémité d'une poutre de VIPP, le long de câbles relevés de précontrainte, par défaut d'étanchéité – Source : RST

Durabilité & développement durable

Importance du contrôle des ouvrages : cas des ponts routiers



Photo n° 17 : dégradation des parements et attaque en profondeur du béton en pied de pile et sur le mur de front d'une culée, par défaut de protection contre un environnement particulièrement agressif – Source : RST

Durabilité & développement durable

La durabilité : une notion chiffrée lors de la conception

La durée de vie des ouvrages est maintenant définie au niveau du cahier des charges et au travers de normes.

Des demandes d'une durée de vie supérieure à 100 ans sont maintenant courantes, ce qui n'est pas sans poser certains problèmes.

Ceci conduit au développement de tests accélérés, de modèles prédictifs (**approche performantielle**) mais aussi à l'instrumentation des ouvrages afin de vérifier si les données utilisées dans la conception sont valides et au besoin reformuler des hypothèses ou concevoir des modifications.

NORME BETON NF EN 206-1

La norme NF EN 206-1 (béton partie 1 : spécifications, performances, production et conformité) définit en plus des spécifications relatives au béton, les responsabilités du prescripteur (responsable de la spécification du béton) et du producteur (responsable de la conformité et du contrôle de la production).

La prise en compte de l'environnement dans lequel va être situé l'ouvrage et les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service, va permettre d'optimiser les performances du béton et sa durabilité. Pour ce faire, on définit des classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement auxquelles les bétons sont soumis.

Tableau n° 1 : classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1

Classe d'exposition	Description de l'environnement	Béton concerné	
XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Béton non armé ou béton armé en environnement très sec	
XC	Corrosion induite par carbonatation	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposé à l'air et à l'humidité	
	XC1		Sec ou humide en permanence
	XC2		Humide, rarement sec
	XC3		Humidité modérée
XC4	Alternance d'humidité et de séchage		
XD	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage	
	XD1		Humidité modérée
	XD2		Humide, rarement sec
	XD3		Alternance d'humidité et de séchage
XS	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin	
	XS1		Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer
	XS2		Immergé en permanence
	XS3		Zone de marnage, zone soumise à des projections ou à des embruns

Tableau n° 1 : classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1

XF		Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est mouillé
	XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	
	XF2	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	
	XF3	Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage	
	XF4	Forte saturation en eau avec agent de déverglaçage	
XA		Attaques chimiques	Béton exposé aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface et/ou les eaux souterraines
	XA1	Environnement à faible agressivité chimique	
	XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée	
	XA3	Environnement à forte agressivité chimique	

Durabilité du béton armé dans son environnement :

Origines des dégradations

Origine physique :

Température :

Gel-Dégel

Incendie

Contraintes :

Choc

Chargement

Fatigue

Origine chimique :

Action sur la pâte de ciment :

Lixiviation (lessivage)

Attaques sulfatiques

Bio-détérioration

Action sur les granulats :

Réaction alcali-silice

Action sur l'acier et les métaux :

Corrosion

Durabilité du béton armé dans son environnement :

Conséquence des dégradations

Nature physique :

Comportement sous une contrainte physique ou chimique (pression de cristallisation) :

Fluage => déformation

Eclatement & écaillage => perte de matière

Gonflement et fissuration => perte de résistance mécanique et augmentation perméabilité

Nature chimique :

Perte de matière par dissolution :

Modification des propriétés de la microstructure => perte de résistance mécanique et augmentation perméabilité

Principes physiques et chimiques gouvernant la durabilité

1. Pâte de ciment hydratée : un système chimique en déséquilibre avec le milieu extérieur
2. Transport de matière dans un milieu poreux réactif (importance de la microstructure et des propriétés de transfert)
3. Evolution des systèmes chimiques à partir de la thermodynamique
4. Contraintes physiques engendrées par les réactions chimiques : pressions de cristallisation

Différents ciments

- Ciment avec 95% clinker :
⇒ CEM I
- Remplacement d'une partie du clinker par différents ajouts :
⇒ CEM II, III IV, V

Caractéristiques différentes vis à vis de la durabilité car microstructure différente.

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse) ^{a)}										Constituants secondaires		
			Constituants principaux												
			Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D ^{b)}	Pozzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné T	Calcaire				
Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Siliceuse V				Calcaire W	L	LL							
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
CEM II/B-LL		65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
Ciment Portland composé ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →									0-5			
	CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →									0-5			
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →				—	—	—	0-5			
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →				—	—	—	0-5			
CEM V	Ciment composé ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 18-30 →		—	—	—	—	0-5			
		CEM V/B	20-38	31-50	—	← 31-50 →		—	—	—	—	0-5			

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.

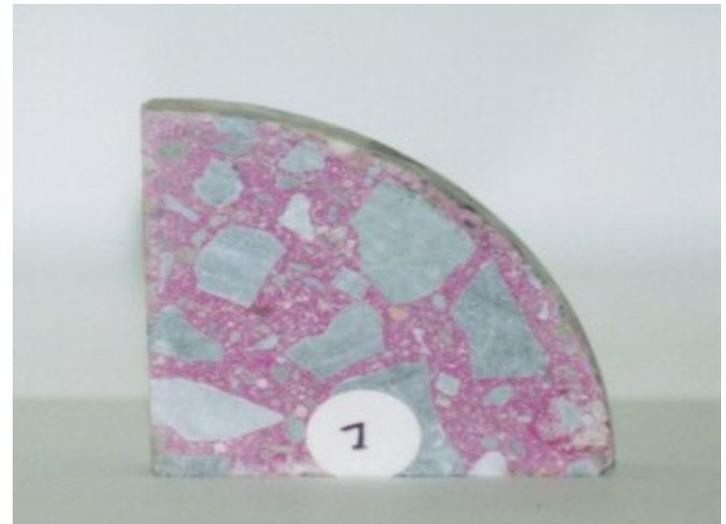
c) Dans le cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple à l'article 8).

Composition de la pâte de ciment

La **pâte durcie de ciment hydraté** renferme outre la porosité :

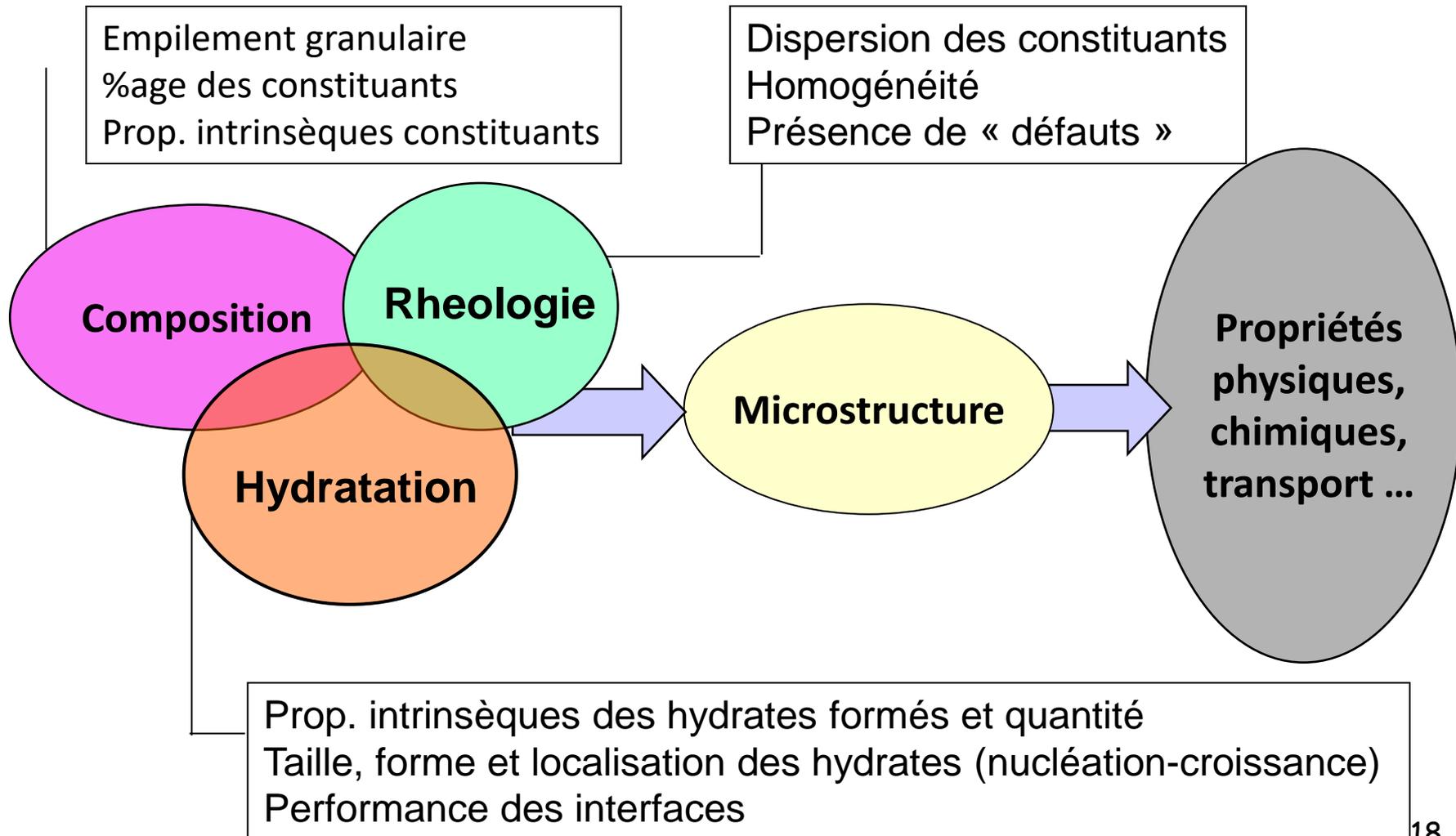
- 15 à 20 % de portlandite (CH)
- environ 70 % de C-S-H
- 10 à 15 % d'aluminates et sulfoaluminates de calcium hydratés
- une solution interstitielle, dans les pores et les capillaires, enrichie en alcalins (NaOH et KOH) dont le pH varie de 12,5 à 13,7.

Mise en évidence du caractère basique de la pâte de ciment hydratée par pulvérisation de phénolphthaléine



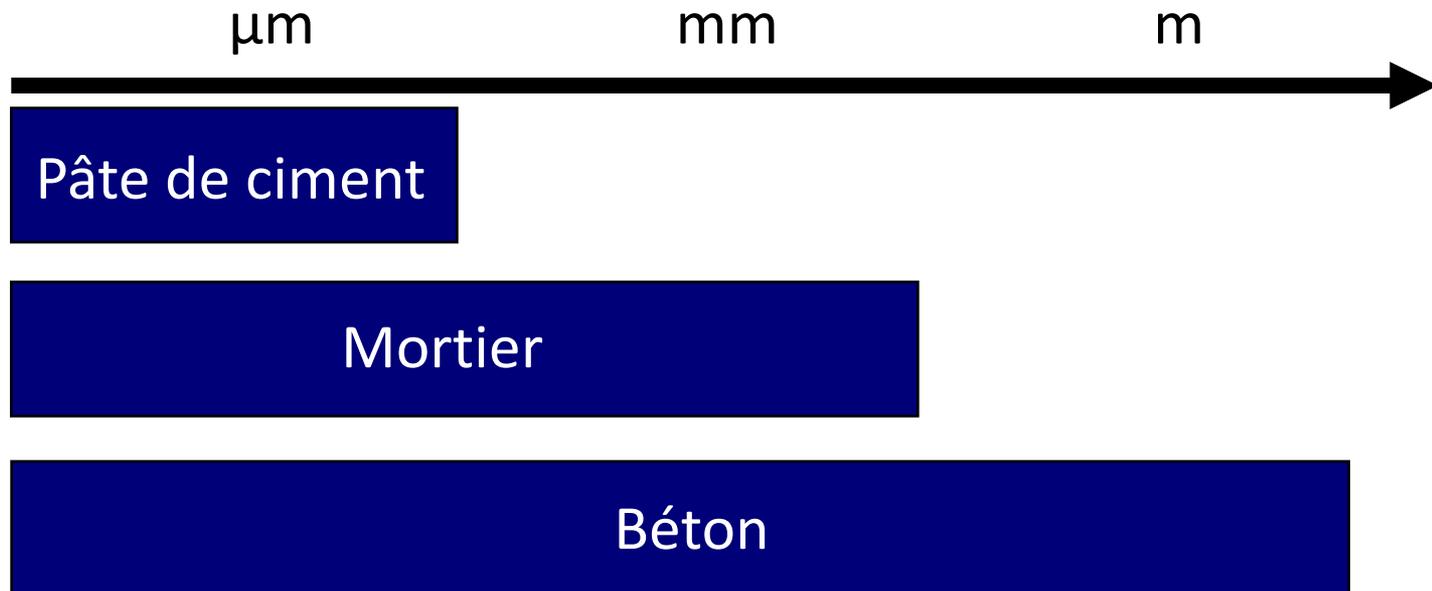
Microstructure du béton

Plusieurs paramètres vont influencer le développement **initial** de la microstructure d'un matériau cimentaire :



Microstructure du béton

La microstructure d'un matériau cimentaire est complexe car elle doit être décrite sur plusieurs ordres de grandeurs :

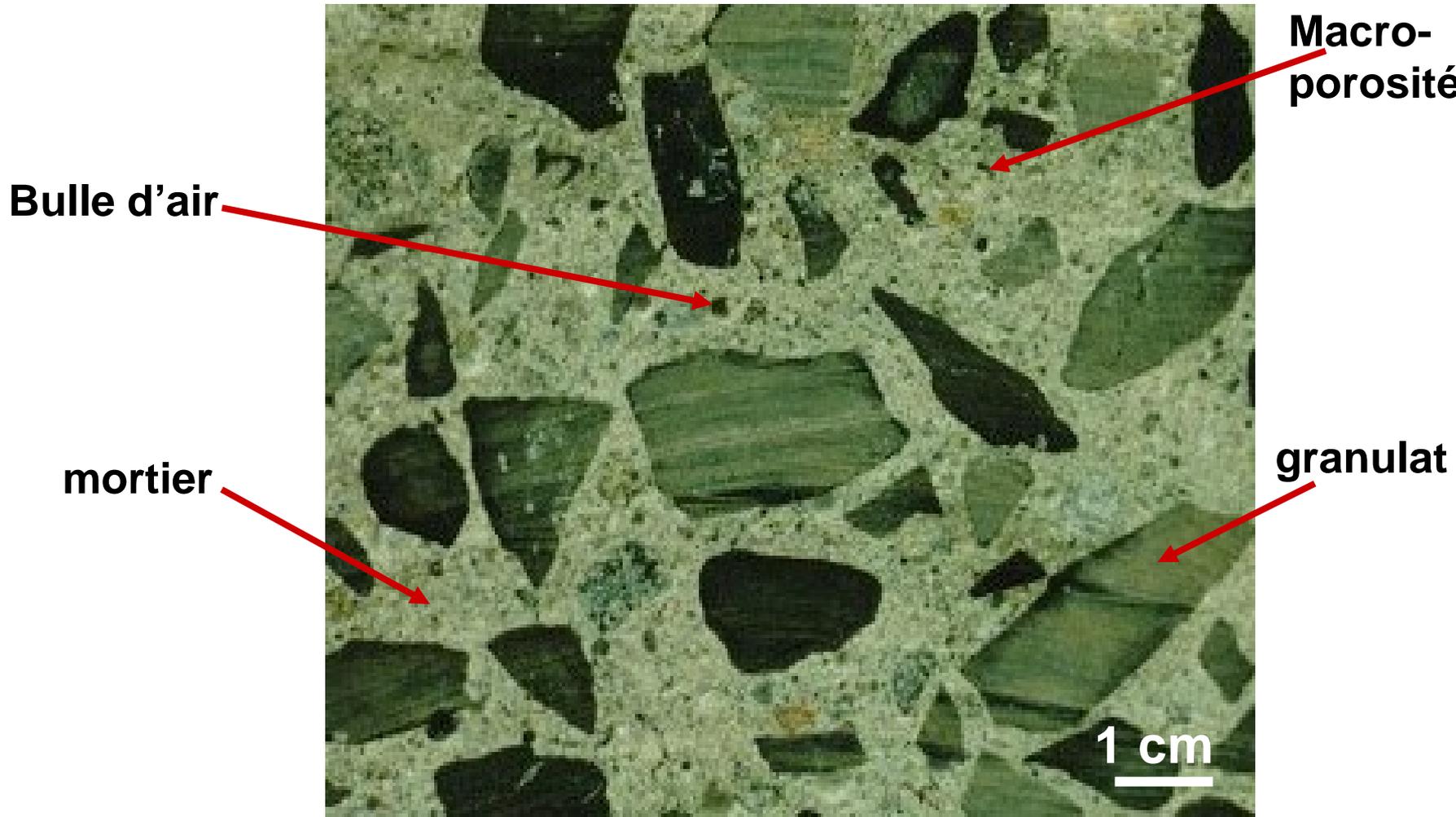


La microstructure d'un matériau cimentaire est difficile à décrire aussi bien en 2D qu'en 3D: il faut recourir à plusieurs techniques mesurant des grandeurs macroscopiques ou des informations plus locales.

Pour suivre l'évolution de la microstructure, il est préférable d'avoir des techniques non destructives reliant certains paramètres de la microstructure à l'hydratation mais aussi à la rhéologie.

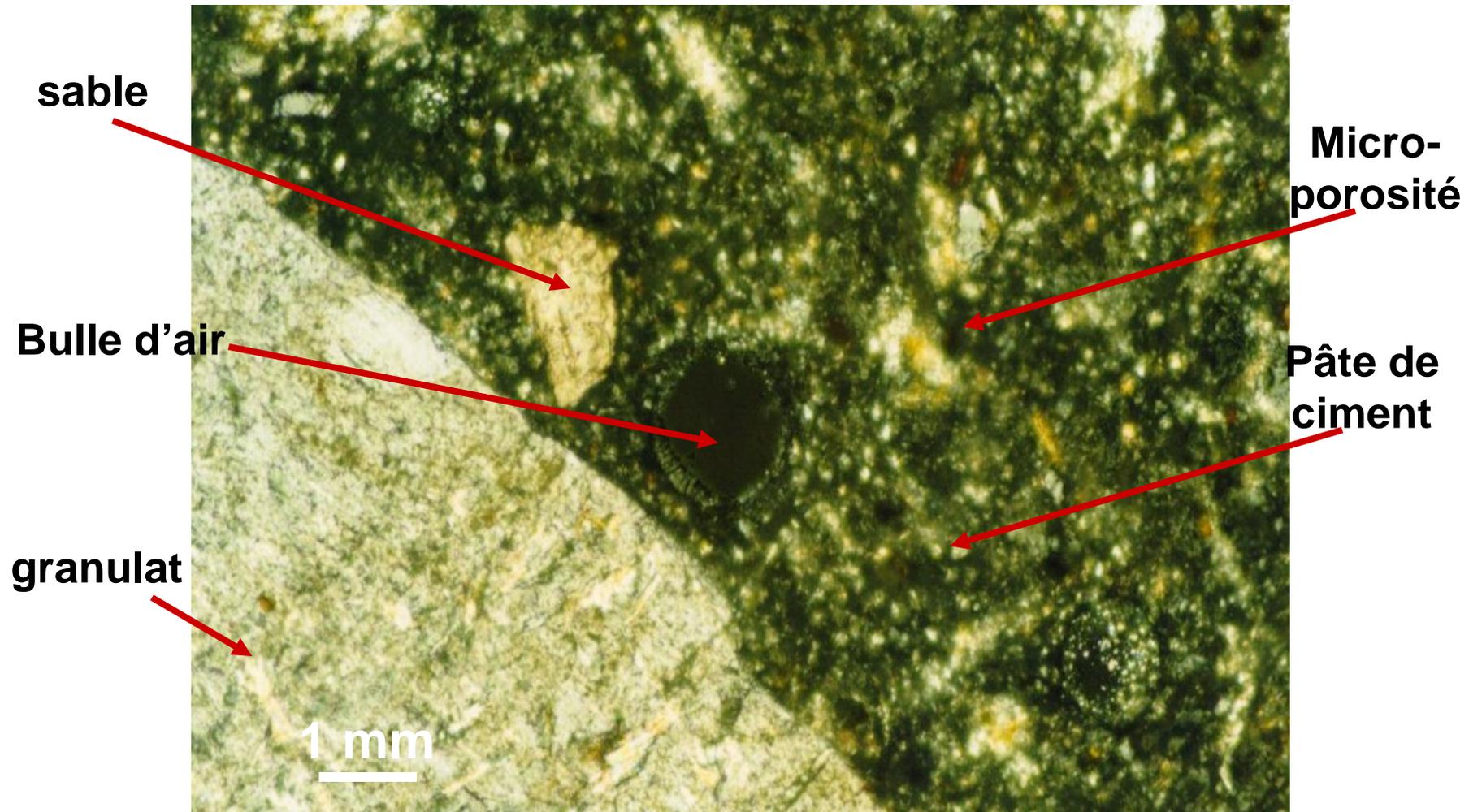
Microstructure du béton

La microstructure 2D du béton à l'œil : solides et vides ...



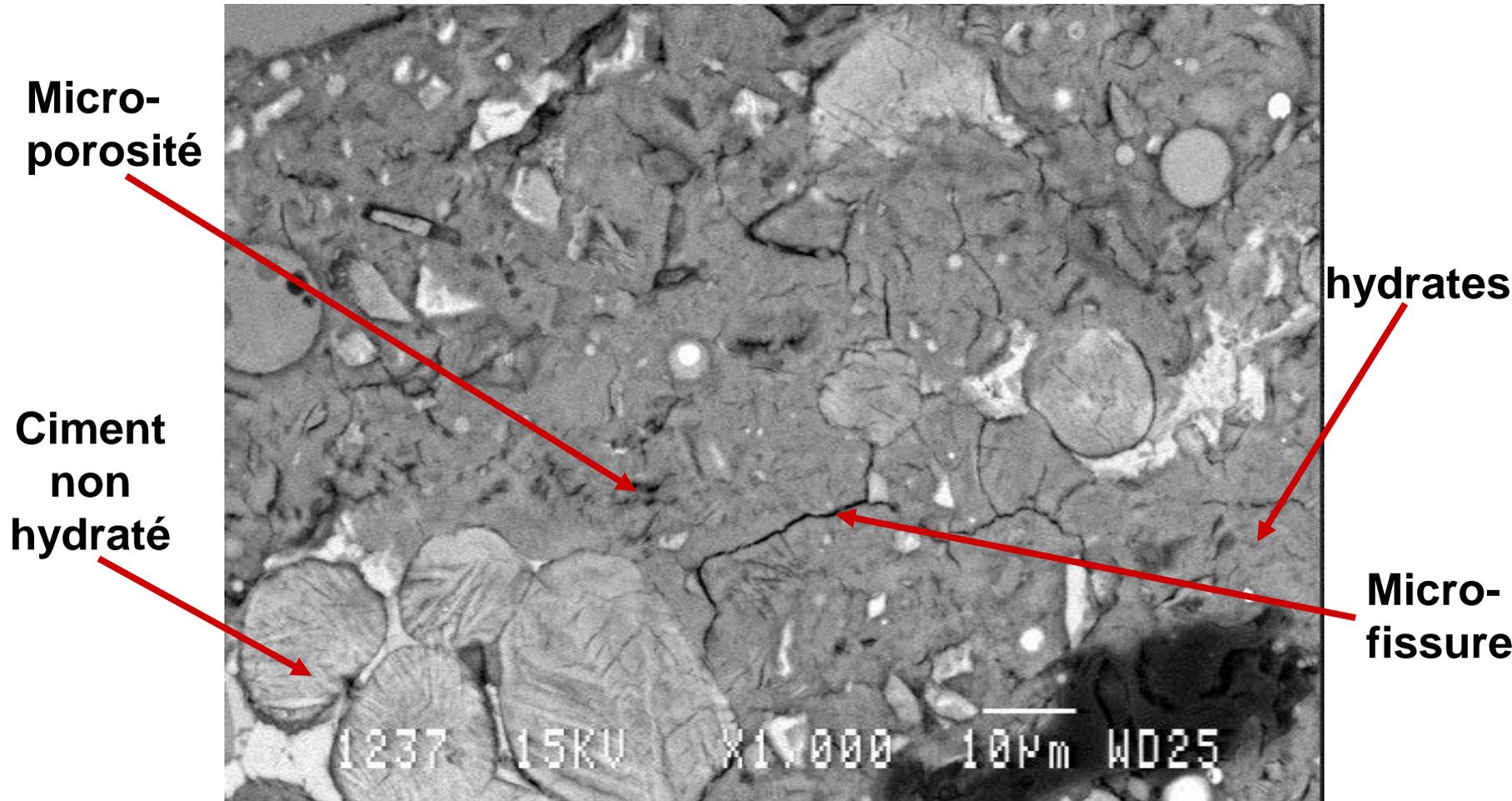
Microstructure du béton

La microstructure 2D du béton au microscope optique (x 300) : solides et vides ...



Microstructure du béton

La microstructure 2D de la pâte de ciment par MEB (x1000) : solides et vides ...



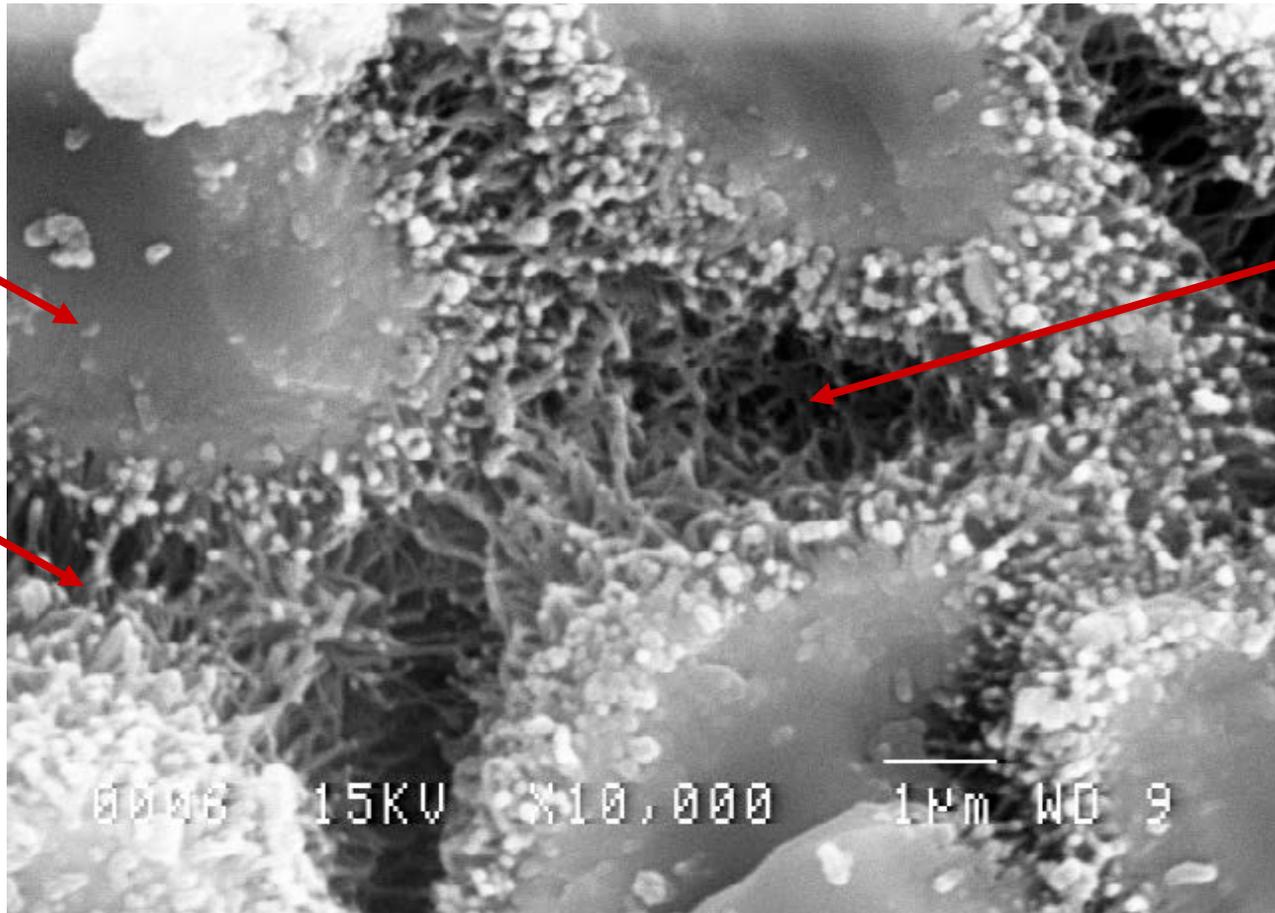
Microstructure du béton

La microstructure 2D de la pâte de ciment par MEB (x10000) : solides et vides ...

Grain de
ciment
non hydraté

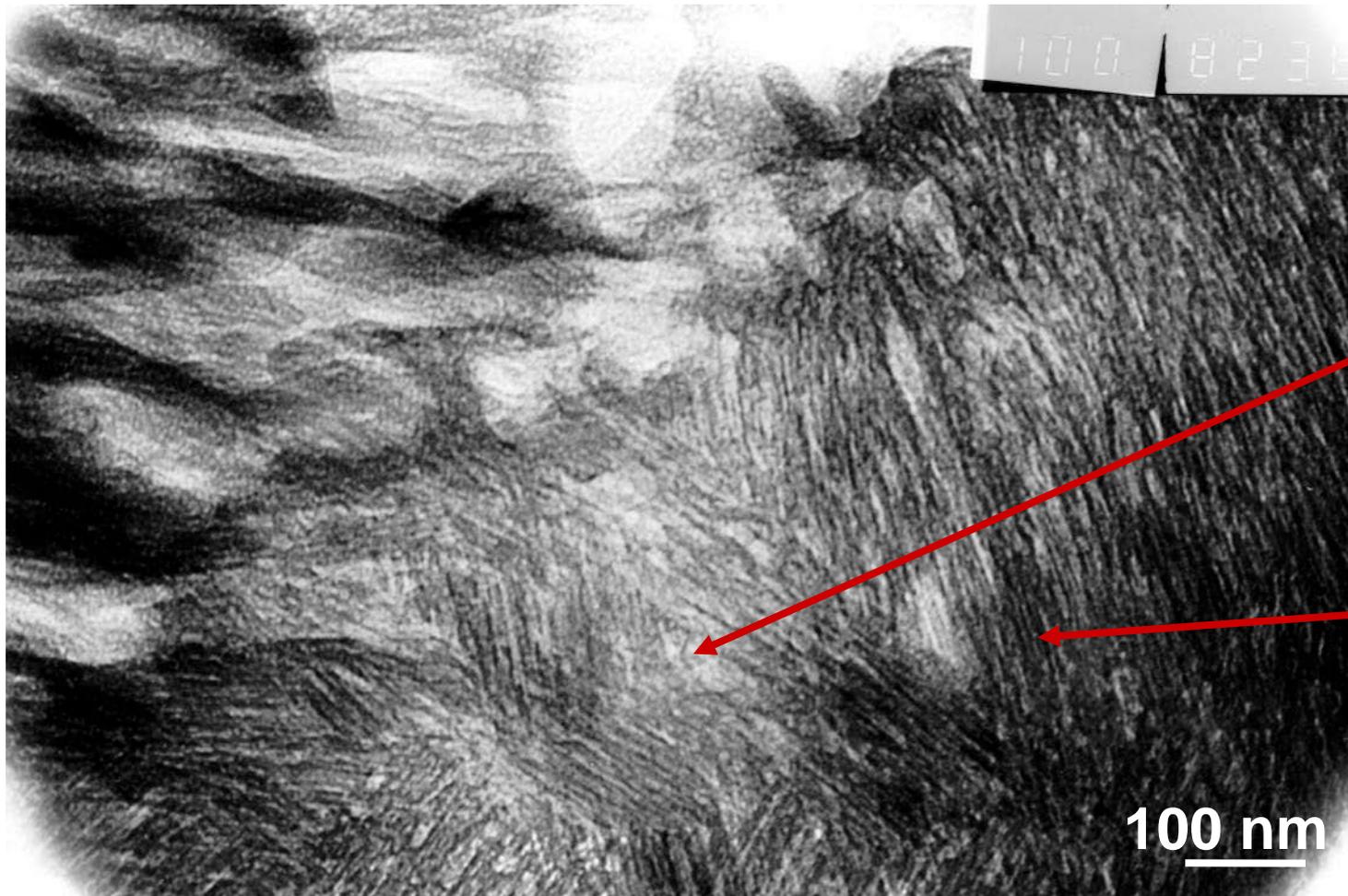
C-S-H

micro
porosité



Microstructure du béton

La microstructure 2D de C-S-H par MET (x100000) ; solides et vides ...



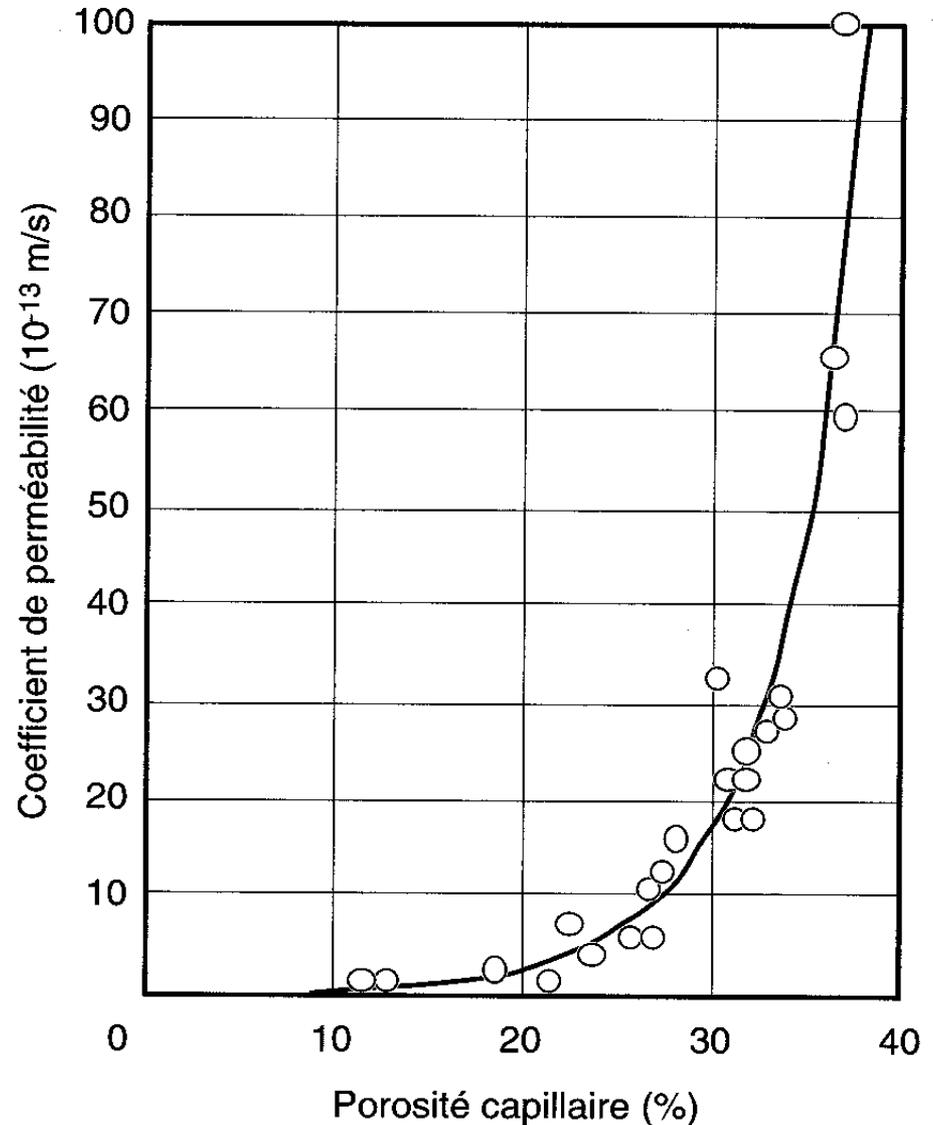
nano
porosité

feuillelet
de C-S-H

100 nm

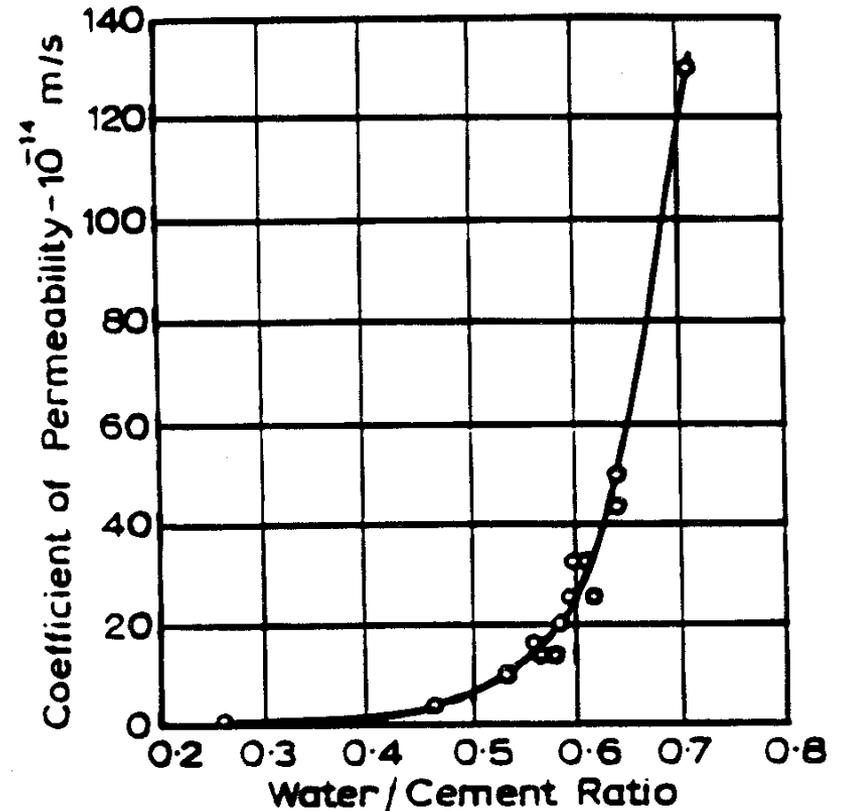
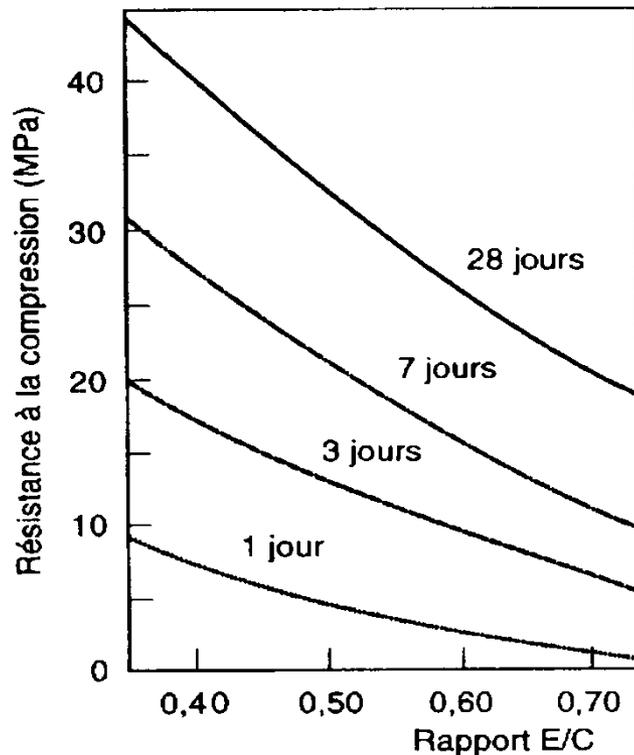
Microstructure du béton

La porosité totale du béton ainsi que la distribution de la taille des pores va jouer un rôle important sur les performances mécaniques mais aussi les échanges de matières entre béton et milieu extérieur : perméabilité et diffusivité.



Effet de la quantité d'eau du béton

La formulation du béton et en particulier le rapport Eau-efficace/Ciment aura donc une grande importance sur la porosité et donc sur les performances finales du béton aussi bien mécanique que d'un point de vue de la durabilité.



Effet de la quantité d'eau du béton et de la réaction pouzzolanique

L'effet de la diminution du E/C conduit à une réduction de la porosité la plus grossière (qui est la plus importante pour le transport de matière), cependant la proportion des pores les plus fins associée à la porosité intrinsèque de C-S-H demeure et peut augmenter si des ajouts pouzzolaniques sont utilisés.

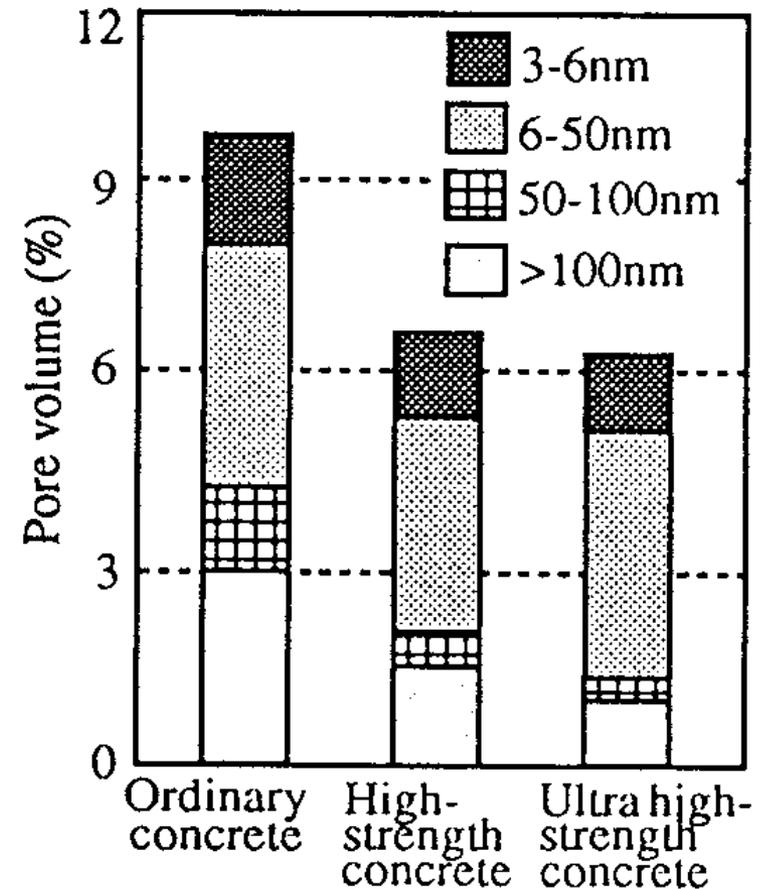


Fig. 16 Pore size distribution of concrete (One year)

Mécanismes de transport dans le béton

2 types de fluides peuvent pénétrer dans le béton (et menacer sa durabilité):

- liquides (eau pure ou contenant des ions agressifs)
- gaz (dioxyde de carbone, oxygène)

3 phénomènes physiques à l'origine des mouvements d'eau dans les réseaux poreux:

- perméabilité : écoulement dû à un gradient de pression
- osmose : écoulement dû à un gradient de concentration
- capillarité : écoulement dû aux tensions de surface

+ diffusion: mécanisme de transport des ions sous l'effet d'un gradient de concentration.

Les gaz peuvent diffuser à travers un espace rempli d'eau ou un espace rempli d'air, mais, dans le premier cas, le phénomène se produit de 10^4 à 10^5 fois plus lentement que dans le second.

Loi de Darcy - Coefficient de perméabilité

Dans un béton saturé, l'écoulement de l'eau dans les pores capillaires obéit à la loi de Darcy qui régit les écoulements laminaires en milieu poreux :

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = K \frac{\Delta h}{L}$$

dq/dt = débit de l'écoulement [m^3/s]

A = section droite de l'éprouvette en [m^2]

Δh = charge hydraulique [m]

L = épaisseur de l'éprouvette [m]

K : coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique [m/s]:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

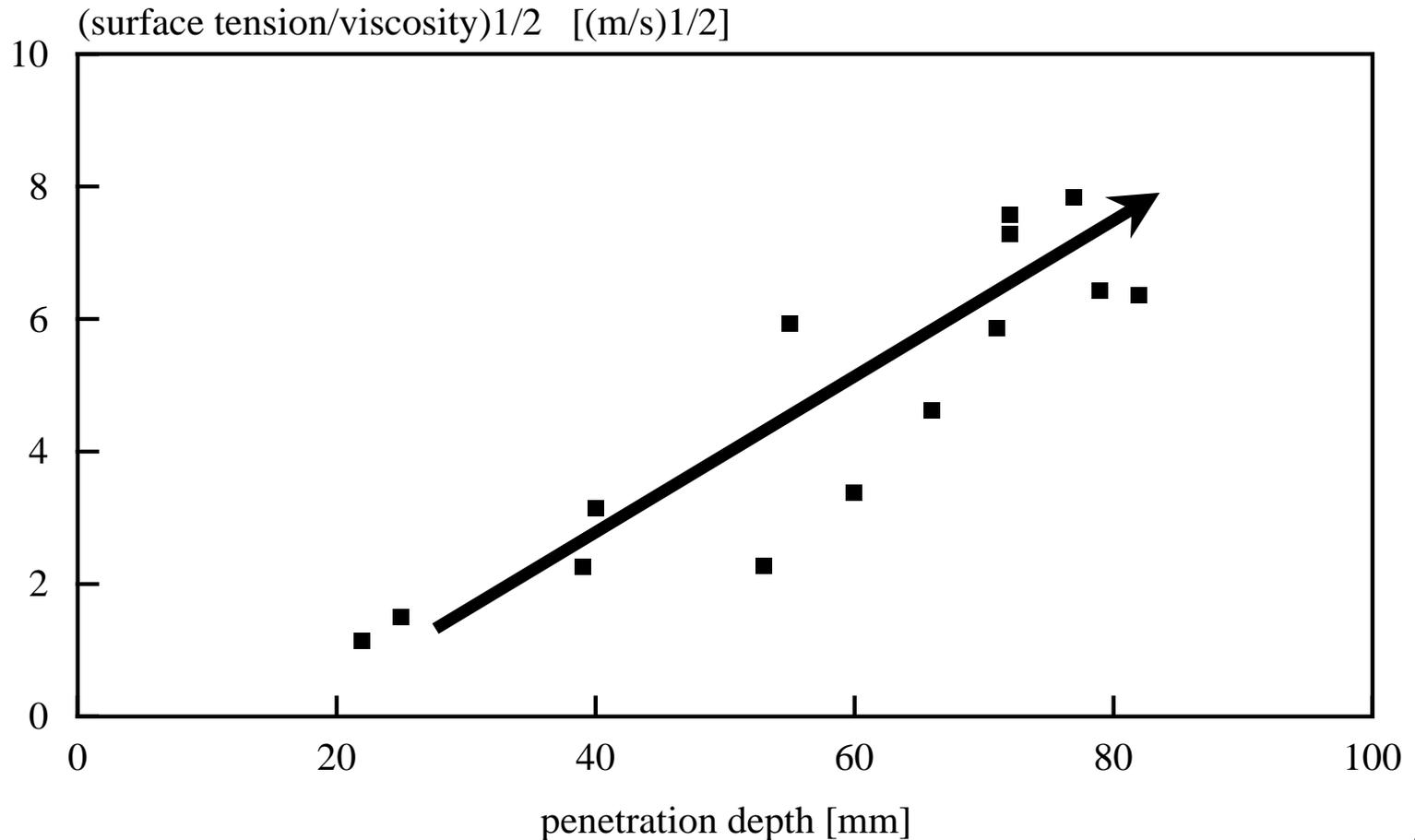
k = perméabilité intrinsèque

le coefficient de viscosité dynamique (μ)

la masse volumique (ρ)

Transport de fluides par capillarité

La pénétration d'une molécule dans le béton est fortement corrélée avec la racine carrée du rapport entre la tension de surface et la viscosité de cette molécule. Plus ce rapport est grand, plus la pénétration est importante :



1^{ère} loi de Fick – Coefficient de diffusion

La diffusion survient lorsque le transport du gaz ou de la vapeur à travers le béton est le résultat d'un gradient de concentration, et non d'un gradient de pression.

La diffusion de la vapeur d'eau peut être exprimée par la première loi de Fick (cas simplifié à une diffusion **unidimensionnelle**) :

$$J = -D \frac{dC}{dL}$$

dC/dL : gradient de concentration en kg/m^4 ou mole/m^4 ,

D : **coefficient de diffusion** en m^2/s ,

J : Flux massique en $\text{kg/m}^2.\text{s}$ (ou $\text{mole/m}^2.\text{s}$),

L : épaisseur de l'éprouvette en m.

Seconde loi de Fick

La variation de la concentration C_i en un point donné varie en fonction du temps quand le régime n'est pas permanent. La résolution de l'équation de conservation, appelée aussi deuxième loi de Fick qui s'écrit dans le cas simplifié d'une diffusion **unidirectionnelle** :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}$$

Tout comme la perméabilité, la diffusion est plus lente à de faibles rapports eau/ciment, **mais l'influence du rapport eau/ciment sur la diffusion est bien moindre que sur la perméabilité.**

Diffusion dans un milieu poreux

La diffusion d'un ion dans un matériau poreux peut être décrite par un coefficient de diffusion effectif , D_e , qui dépend de l'ion considéré, de la composition de la solution *interstitielle* et de la structure poreuse du matériau :

$$F_i = -D_e \frac{\partial C_i}{\partial x}$$

La deuxième loi de Fick s'écrit :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} = \frac{D_e}{p} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}$$

Avec p la porosité accessible au liquide

D_a : le coefficient de diffusion apparent du matériau poreux ne présentant pas d'interaction avec l'espèce diffusante.

Les coefficients de diffusion D_e et D_a intervenant dans les deux lois de Fick sont différents.

Effet du type de pâte ciment sur la diffusivité

Influence du rapport E/C et de la réaction pouzzolanique sur la diffusion du tritium :

Valeurs comparatives de coefficients de diffusion effectif du tritium

Matériau	E/C	De (m ² /s)	Source
Pâte de CPA	0,4	5,4.10 ⁻¹²	[RIC,92]
Pâte de Ciment avec laitier et cendres volantes	0,4	2,8.10 ⁻¹³	[ADE,97]
Pâte de CPA	0,2	2,0.10 ⁻¹²	[MAT,99]
Pâte de CPA + 32,5% de fumée de silice	0,2	1,5.10 ⁻¹⁴	[MAT,99]

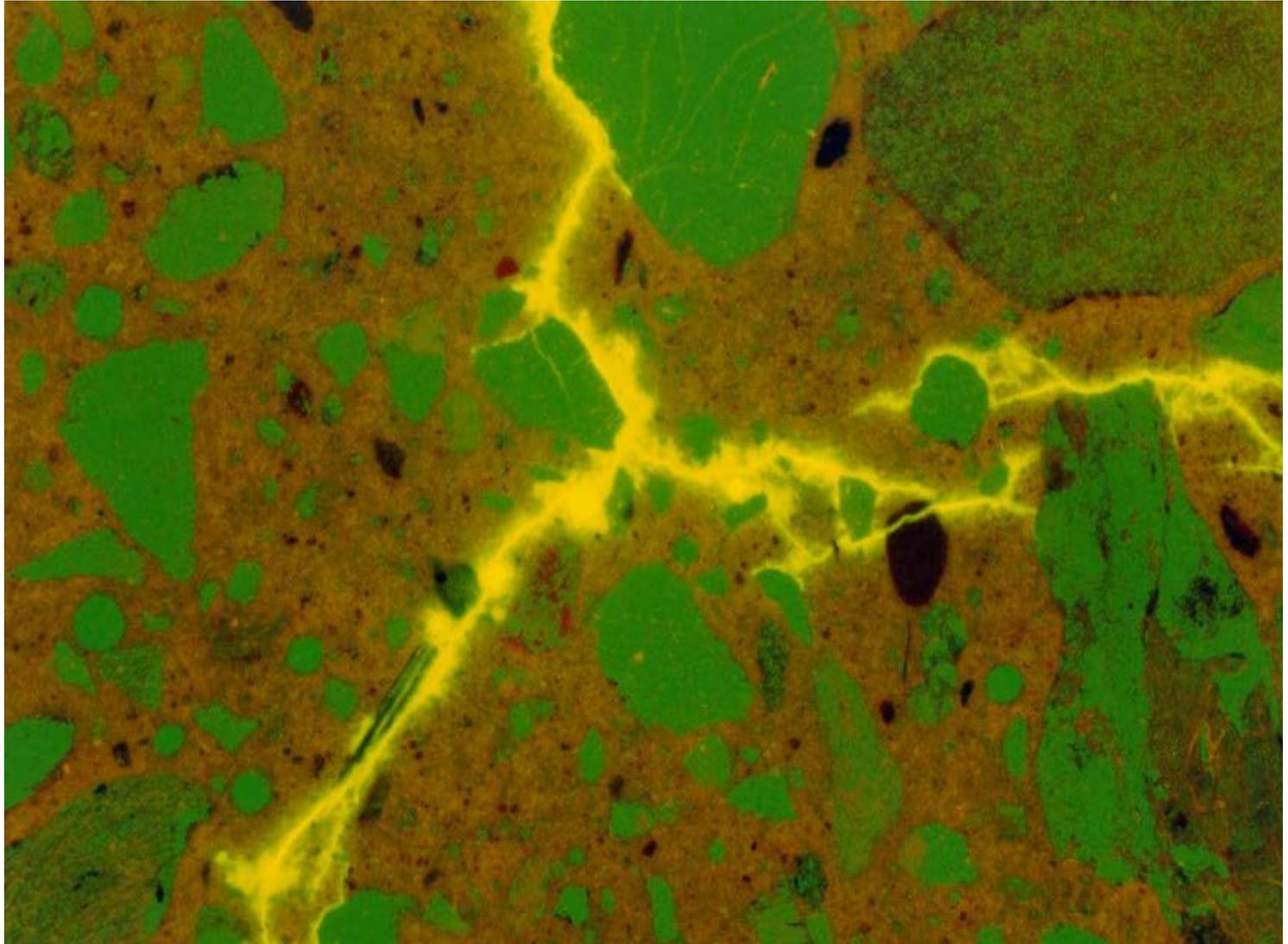
Effet des (micro)fissures

La présence de fissures ayant une taille centimétrique à micrométrique, conduit à un accroissement de la perméabilité et à une diminution des résistances mécaniques.

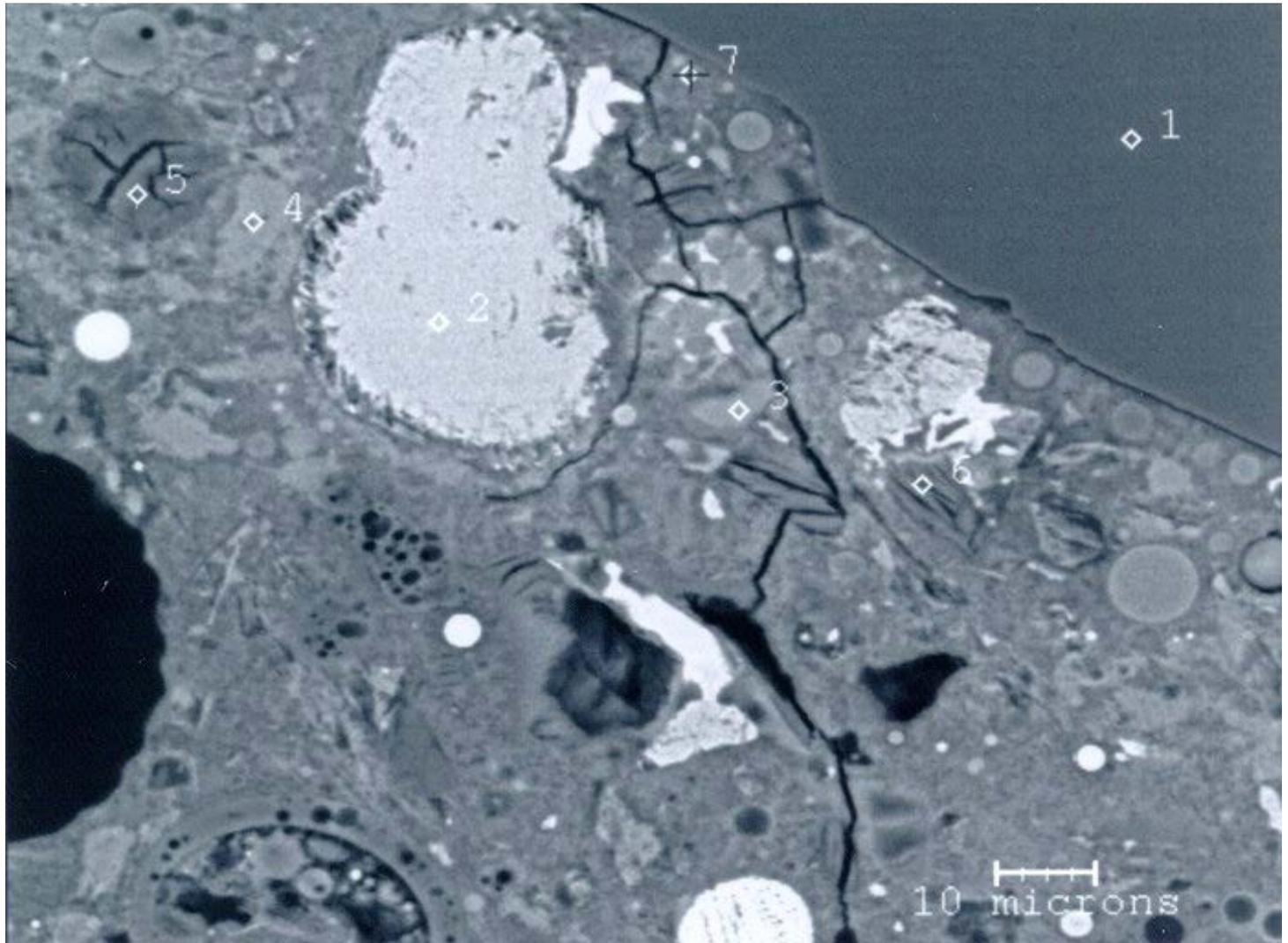
Toute dégradation, qu'elle soit d'origine mécanique ou chimique se traduit par l'apparition d'une microfissuration, d'abord plus ou moins diffuse et peu connectée qui, par coalescence, conduit à la formation de fissures plus importantes.

Bien qu'affectant modérément les coefficients de diffusion (principalement à cause d'interaction chimique matrice – espèce diffusante), les microfissures jouent un rôle de court-circuit local.

Micro-fissures vues au microscope optique avec résine fluorescente X 100



Micro-fissures vues au microscope électronique (section polie) X 4000



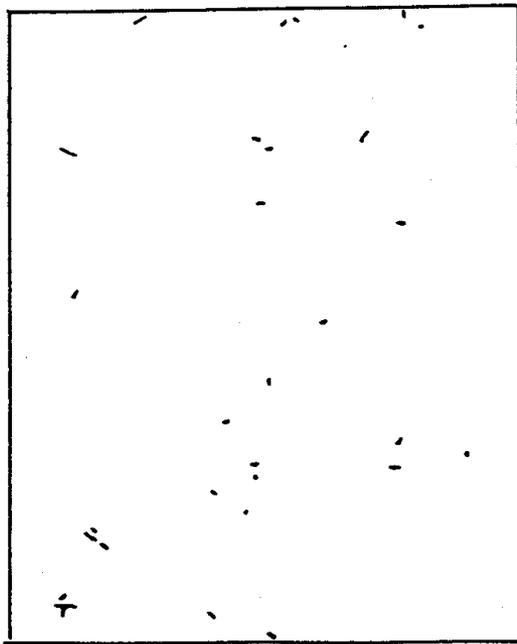


Fig. 11a - Cartographie de la microfissuration d'un BHP soumis à l'essai de traction BIBEDE[3, 6]. Phase élastique. Fissuration diffuse peu connectée. Pas de modification de la perméabilité
 $e \leq 2.10^{-4}$ $K = 1.10^{-12}$ m/s

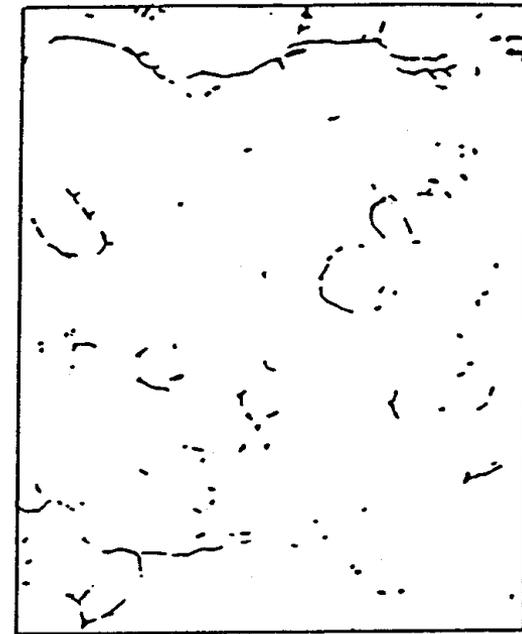


Fig. 11b - Cartographie de la microfissuration d'un BHP soumis à l'essai de traction BIBEDE. Voisinage du pic. Fissuration diffuse peu connectée. Augmentation brusque de la perméabilité
 $e \leq 4.10^{-4}$ $K = 1.10^{-8}$ m/s

(Surface = 40 x 50 mm environ)

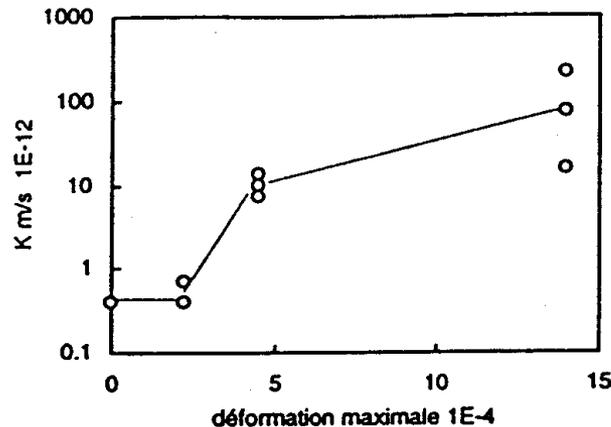
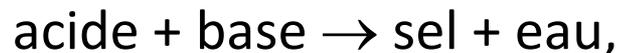


Fig. 12 - Evolution de la perméabilité à l'eau en fonction du niveau de chargement du BHP ^[3]

Mécanismes de dégradation chimique

Sauf cas exceptionnel, le pH de l'environnement est bien inférieur à celui des pores de la pâte de ciment hydraté (pH>12.5). Il en résulte que le béton est en déséquilibre avec le milieu extérieur.

D'une façon élémentaire, on peut écrire :



ce qui donne :



Cette réaction est préjudiciable à la bonne tenue du béton **si le sel formé occupe un volume supérieur à celui des constituants initiaux** : pression de cristallisation conduisant à une microfissuration.

Le béton a un fort potentiel pour résister aux agressions chimiques

- constitution de **barrières d'hydrates**, à partir des produits des réactions avec le milieu extérieur. Ces barrières ralentissent, voire empêchent la progression des ions vers le cœur du béton : cas des couches de calcite (CaCO_3) ou de brucite (Mg(OH)_2).
- tant qu'il reste du clinker anhydre résiduel, et en présence d'eau, une **autocicatrisation** des microfissures ou des pores créés au cours des agressions chimiques peut intervenir.
- la bio-minéralisation peut aussi conduire à cicatriser des fissures.

Evolution du béton dans son environnement

Les lois qui gouvernent l'hydratation du ciment (évolution des phases anhydres au contact de l'eau en hydrates), gouvernent de la même manière l'évolution des phases hydratées si elles sont mises en contact avec un milieu **dans lequel des phases moins solubles sont susceptibles d'exister**.

Deux facteurs déterminent l'évolution de la pâte de ciment durcie dans un environnement donné:

- **facteur thermodynamique:** contrôle la stabilité des hydrates en fonction des conditions extérieures
- **facteur cinétique (notamment relié à la microstructure):** joue un rôle sur l'accessibilité des agents extérieurs aux phases hydratées à travers les lois de Fick et de Darcy.

La prise en compte des réactions chimiques dans la modélisation du transport de matière est appelée « **transport-réactif** ».

Dans la plupart des cas, la cinétique de transport est limitante devant la cinétique de réaction chimique => **hypothèse de l'équilibre local**

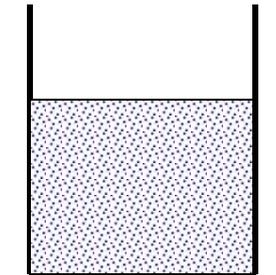
Approche thermodynamique des dégradations

La **thermodynamique** permet de connaître l'évolution potentielle d'un système chimique soumis à un environnement avec lequel il n'est pas en équilibre :

seuls les assemblages de phases finaux et initiaux sont considérés : la cinétique et le chemin réactionnel ne sont pas définis par cette approche.

Par exemple : simulation de la lixiviation par l'eau pure d'une pâte de ciment complètement hydratée et broyée (pour s'affranchir de la diffusion dans le milieu poreux).

Simulation de la lixiviation par l'eau pure d'une pâte de ciment simplifiée

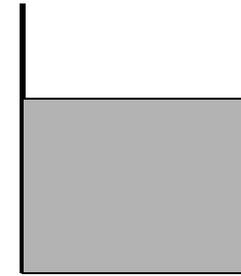
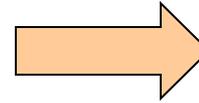


1 L eau pure

+ 57 mM CH + 74
mM C-S-H

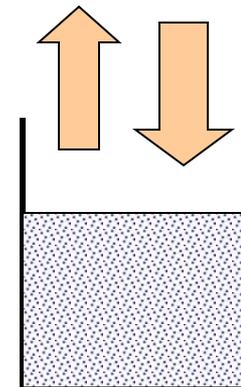
Systeme simplifié representatif
d'une pâte de ciment
complètement hydratée

1er cycle



1 L d'eau équilibrée avec les
solides qui se sont (partiellement)
dissous et ceux qui auraient pu
précipiter

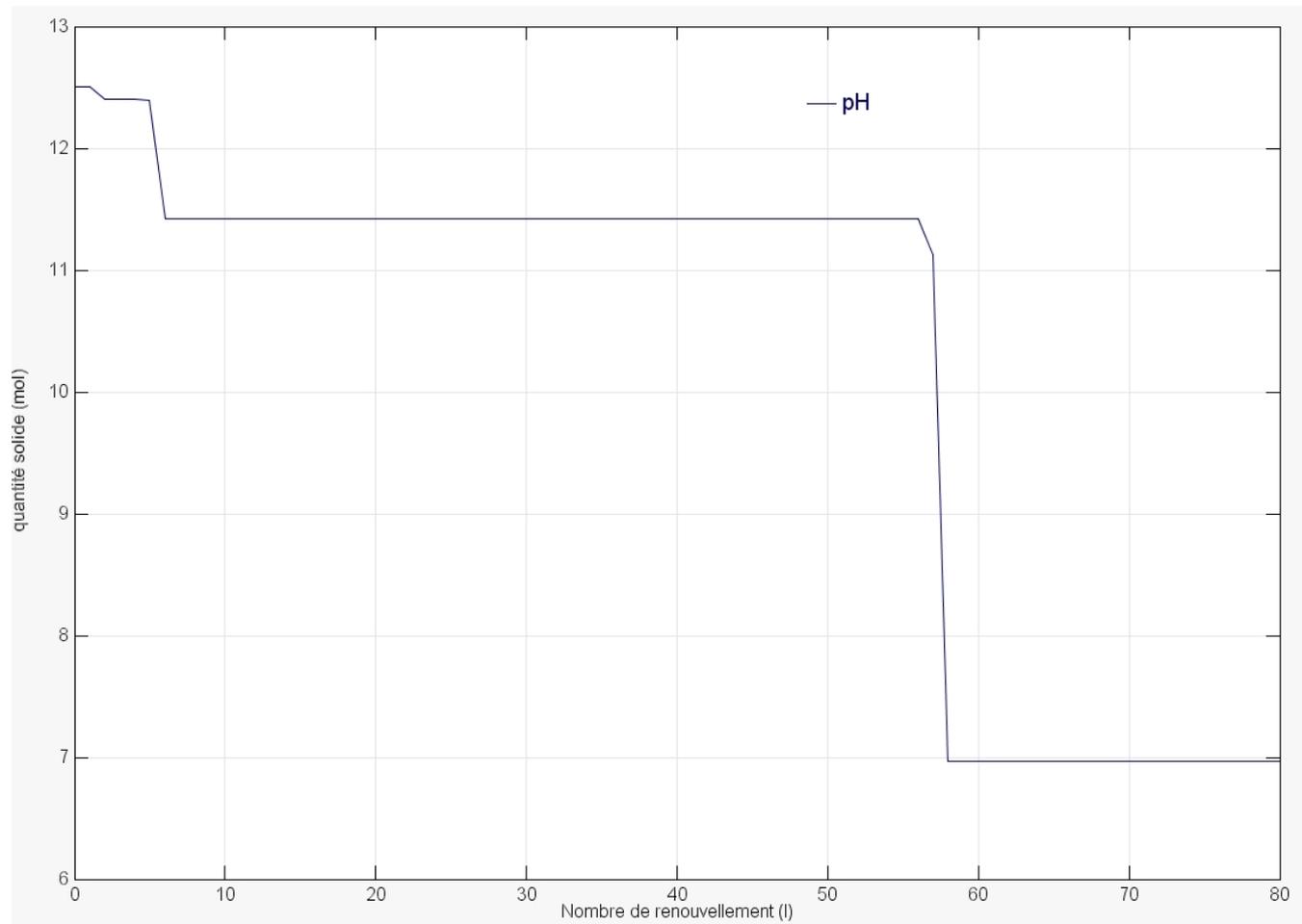
n cycles



Remplacement de la phase
aqueuse par 1 L eau pure

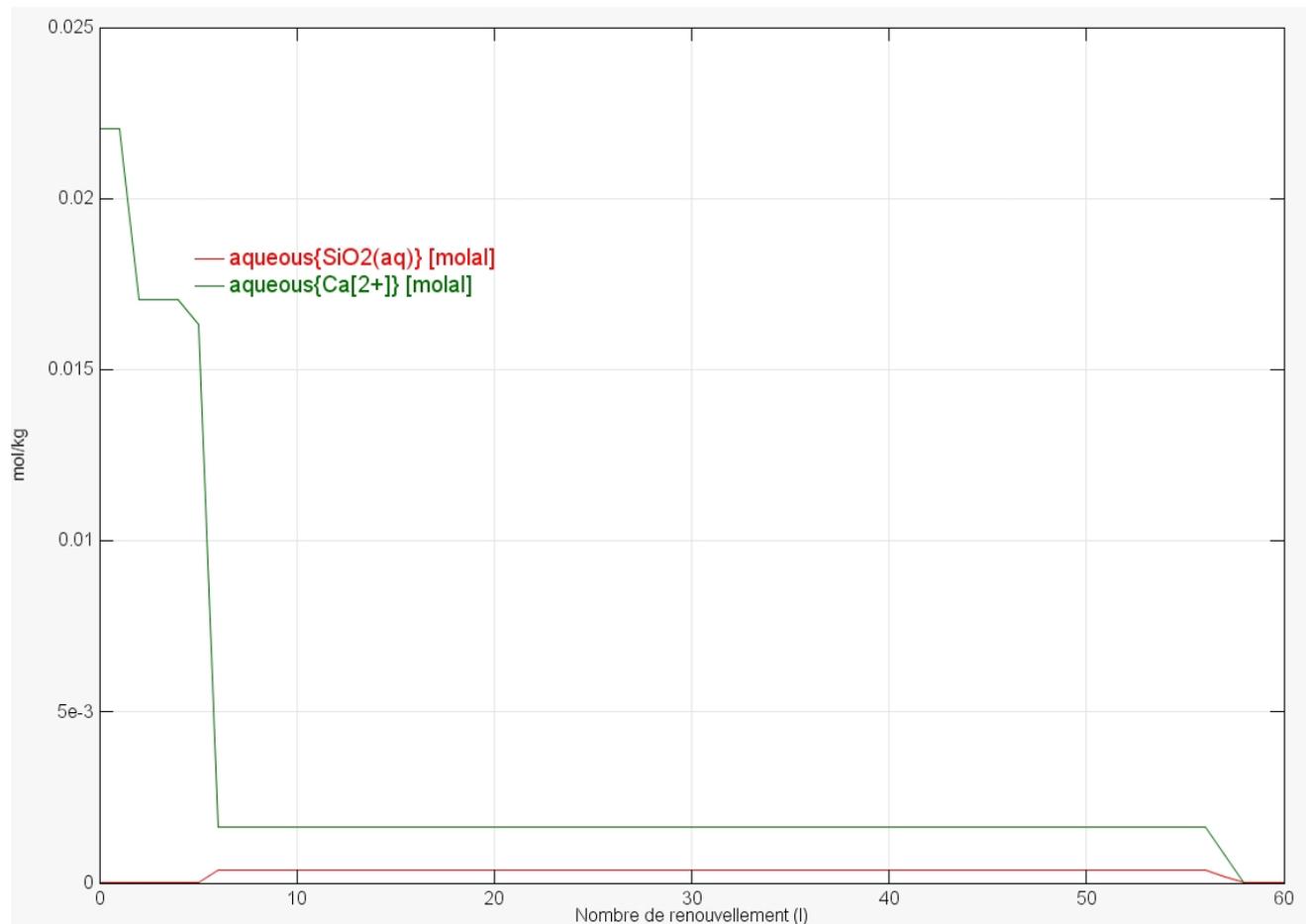
Simulation de la lixiviation par l'eau pure d'une pâte de ciment simplifiée

Evolution du pH en fonction du nombre de cycles de renouvellement :



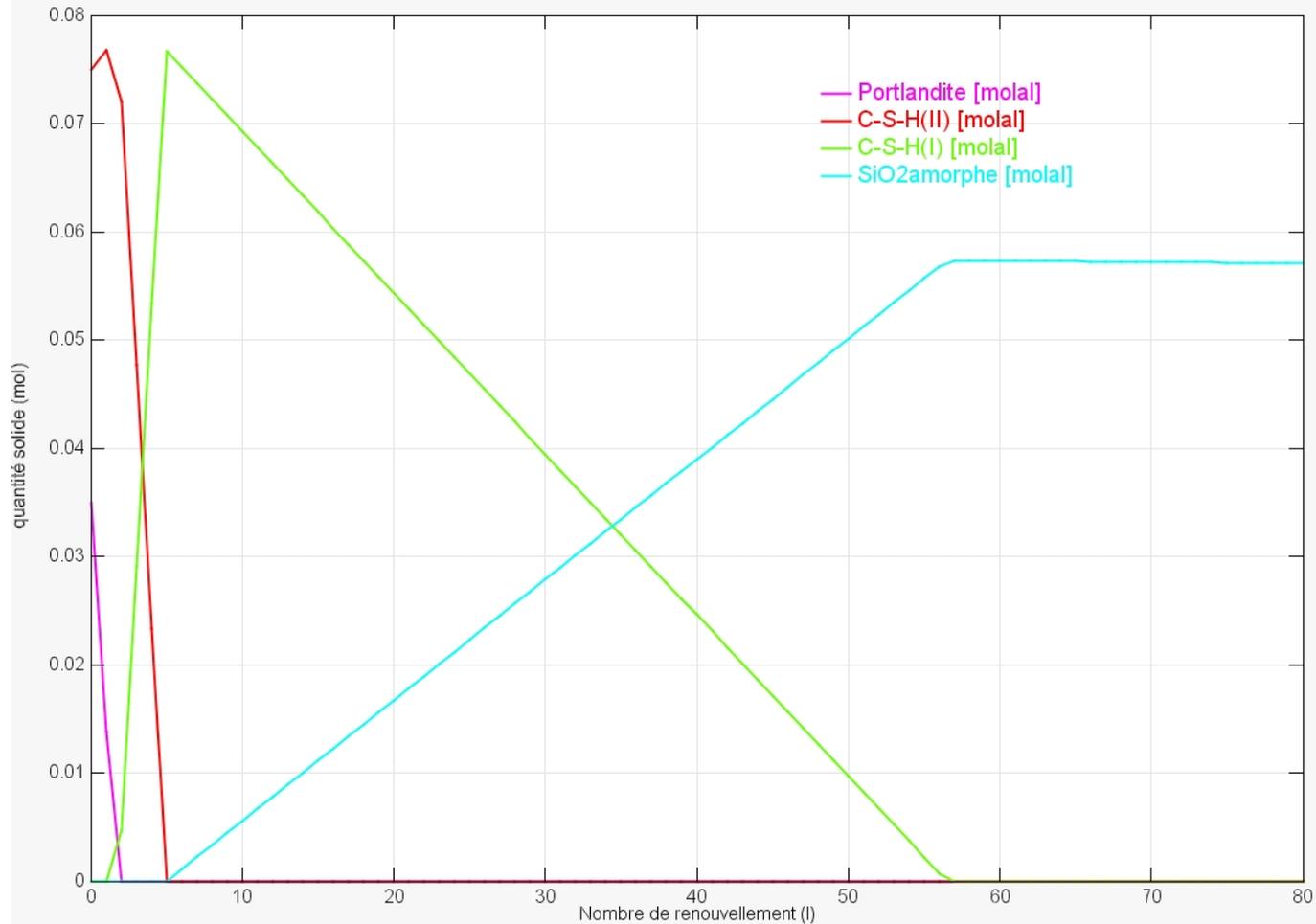
Simulation de la lixiviation par l'eau pure d'une pâte de ciment simplifiée

Evolution des concentrations en fonction du nombre de cycles de renouvellement :

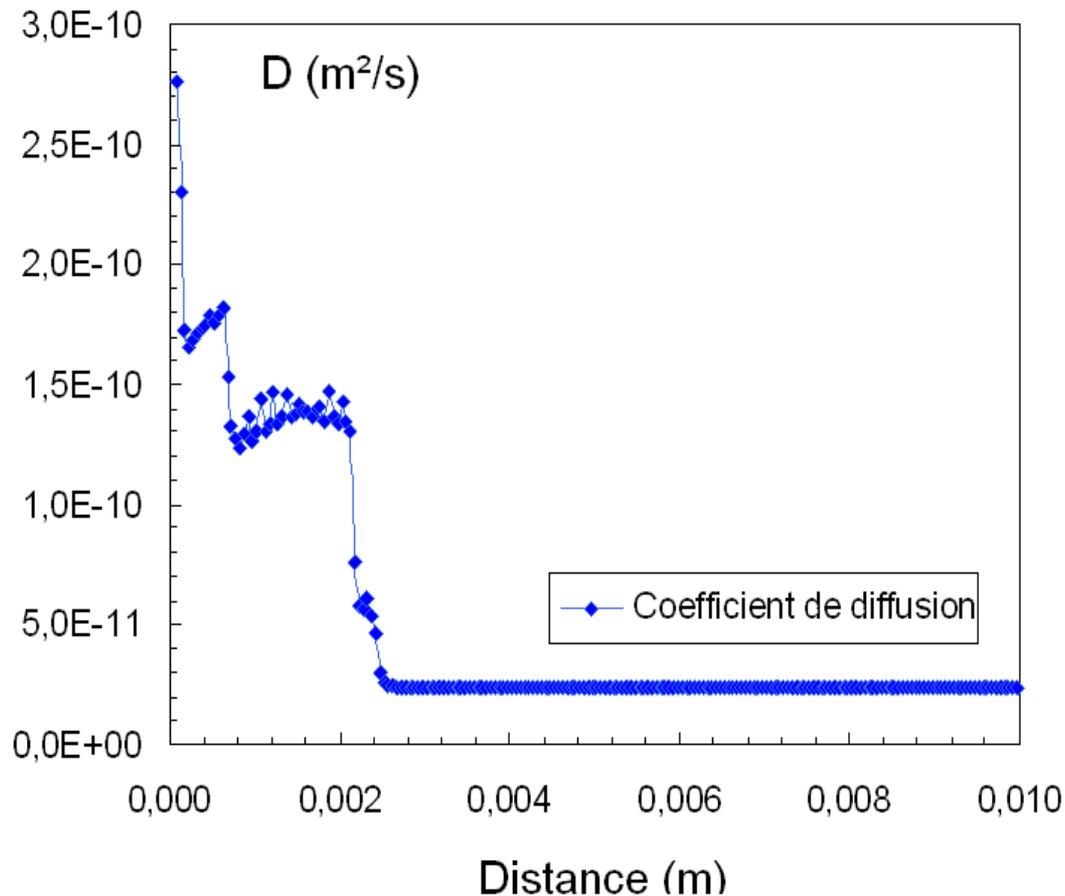


Simulation de la lixiviation par l'eau pure d'une pâte de ciment simplifiée

Evolution des assemblages de phases en fonction du nombre de cycles de renouvellement :



Relation entre coefficient de diffusion et porosité totale (milieu saturé)



La méthode précédente basée sur la porosité totale, n'est pas efficace dans le cas de **précipitation d'une couche protectrice.**

Dans ce cas seule une approche à partir d'une microstructure 3D est possible (voir modélisation).

Relation entre perméabilité et porosité totale (milieu saturé)

De nombreuses lois reliant porosité et perméabilité sont disponibles et la plupart reposent sur une adaptation de la loi de Kozeny – Carman.

La perméabilité peut ainsi être exprimée en fonction de la perméabilité et de la porosité initiales :

$$K = K_0 \frac{\omega^3 / (1 - \omega)^2}{\omega_0^3 / (1 - \omega_0)^2}$$

ω est la porosité, ω_0 est une porosité initiale et K_0 la perméabilité initiale

Pression de cristallisation

Suivant les conditions de **sursaturation** de la solution environnante et de **l'espace disponible**, la formation des cristaux peut engendrer des **pressions suffisantes pour provoquer la fissuration d'un matériau**.

La relation donnée par Winkler permet d'estimer de façon simplifiée la **pression de cristallisation** p d'un sel à partir d'une solution de concentration C , sachant que la saturation est atteinte à une concentration C_s :

$$p = \frac{RT}{V_s} \text{Log} \frac{C}{C_s}$$

avec R = constante des gaz parfaits

T = température en °K

V_s = volume molaire du sel

Pression de cristallisation

PRESSION DE CRISTALLISATION DE QUELQUES SELS [*]

Sel	Composition	Pression de cristallisation (MPa)					
		C/C _S = 2		C/C _S = 10		C/C _S = 50	
		0 °C	50 °C	0 °C	50 °C	0 °C	50 °C
Anhydrite	CaSO ₄	33,5	39,8	112,0	132,5	190,0	226,2
Gypse	CaSO ₄ .2H ₂ O	28,2	33,4	93,8	111,0	159,5	190,0
Kiesérite	MgSO ₄ .H ₂ O	27,2	32,4	91,0	107,9	154,3	184,0
Thénardite	Na ₂ SO ₄	29,2	34,5	97,0	115,0	165,0	196,5
Mirabilite	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	7,2	8,3	23,4	27,7	39,7	47,3
Bischofite	MgCl ₂ .6H ₂ O	11,9	14,2	39,7	47,0	67,5	80,3
Halite	NaCl	55,4	65,4	184,5	219,0	313,5	373,7
Thermonatrite	Na ₂ CO ₃ .H ₂ O	28,0	33,3	93,5	110,9	159,0	189,1

[*] d'après Winkler. Stone : *Properties, Durability in Man's Environment*, Springer Verlag, New-York, 1975