

CHAPITRE I

CARACTERISTIQUES MICROSTRUCTURALES DES BETONS

I.1 INTRODUCTION

La plupart des propriétés, et aspects physico-chimiques de béton, sont directement liés aux caractéristiques de la pâte de ciment durci. Cette dernière qui représente 25% à 40% du volume de béton à une microstructure très complexe, qui semble dépendre non seulement de sa composition chimique hydraté mais aussi de sa structure physiques des produits d'hydratation. Cette affirmation est valable aussi bien pour les caractéristiques et propriétés mécaniques que pour la durabilité.

En outre, la durabilité à une grande relation à la microstructure du béton et l'identification de sa structure poreuse simulant l'état de la microstructure hydratée est une clef à la compréhension de beaucoup de phénomènes liés au transport. Ceci permettra certainement à la conception d'un matériau béton plus performant.

A l'aide des éléments bibliographiés, le présent chapitre décrit le béton durci, en premier lieu comme étant un matériau poreux, en montrant l'importance de l'analyse de l'hydratation à l'échelle microscopique de la pate cimentaire, avec notamment les aspects théoriques concernant le phénomène de pénétration des chlorures, lesquelles décrivent les propriétés de transport dans le béton, et ses conséquences sur la dégradation, aussi le contexte normatif. Puis une étude descriptive de différents travaux effectués sur la mesure de la perméabilité et la diffusion, ainsi que les lois proposées pour estimer leurs coefficients correspondant à partir des essais expérimentaux.

I.2 MICROSTRUCTURE DU BETON

Le béton est un matériau composé de ciment, d'eau, d'adjuvants et des granulats. Les granulats ont des comportements généralement stables dans le temps. Le comportement d'un béton dépend alors de la structure physico-chimique de la pate de ciment; d'où l'intérêt de connaitre ses caractéristiques.

I.2.1 Structure de la pate de ciment

I.2.1.1 Le ciment anhydre

A l'état anhydre le ciment Portland est essentiellement composé de clinker, sa composition chimique est constitué de deux grandes familles d'oxydes, la première de la calcination de

l'argile et donnant un caractère acide au ciment tel que les SiO_2 , les Fe_2O_3 , les Al_2O_3 , etc. La deuxième résulte du calcaire sous forme de CaO , ayant un caractère chimique basique.

Sous forme simplifiée, les principaux constituants chimiques résultant, ainsi que leur notation cimentière, sont les suivants :

- le silicate tricalcique (ou alite) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) 50 – 70 %
- le silicate bicalcique (ou belite) : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) 15 – 30 %
- l'aluminate tricalcique : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) 5 – 15 %
- l'aluminoferrite tétracalcique : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) 5 – 10 %
- Autres en faibles quantités tels que les alcalins, sulfates, filler calcaire, impuretés, ...

Les ciments couramment utilisés en génie civil contiennent en majorité du clinker Portland, à l'origine des propriétés liantes du ciment ou du liant composé. Ce clinker est constitué d'une proportion massique au moins égale à 2/3 (norme NF EN 197-1) de silicates de calcium (C_3S et C_2S en notations conventionnelles de la chimie des ciments), la partie restante contenant du C_3A et C_4AF .

I.2.1.2 Hydratation du ciment

La pâte de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment (la réaction d'hydratation). En fait, plusieurs mécanismes sont à l'origine de la réaction d'hydratation : adsorption, hydrolyse, dissolution, solvatation, cristallisation (Baron, 1995).

Ce processus de réaction chimique est complexe où les principaux composés du ciment C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF en présence de gypse (comme régulateur de prise) réagissent pour former de nouveaux composés insolubles aboutissent à la formation de la pâte de ciment durcie, milieu poreux composé de phases solides hydratées et d'une solution poreuse interstitielle.

Par ailleurs, l'évolution progressive de l'hydratation du ciment, qui se traduit par une augmentation des propriétés mécaniques, ne suffit pas pour remplir tout l'espace occupé initialement par l'eau, nous avons donc un corps poreux plus ou moins rempli d'eau dont une partie joue un rôle important dans la cohésion de la pâte cimentaire. En fait, la quantité d'eau de gâchage mise en œuvre sera pour le cas général multipliée par deux par rapport à la quantité qui serait strictement nécessaire pour que la réaction de l'hydratation soit achevée à 100% (Acker, 1988).

La pâte de ciment hydraté est formée essentiellement par :

- Les hydrates (C-S-H, Ca(OH)_2 , sulfoaluminates)
- Des grains de ciment non-hydraté
- Des espaces capillaires
- Des bulles d'air

La figure I-1 montre une représentation schématique d'une pâte de ciment partiellement hydraté. On y retrouve:

- Des grains de ciment (10 à 80 μm au départ) partiellement hydratés et recouverts d'une couche d'hydrates.
- Des capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau, des hydrates surtout des C-S-H et de la chaux qui remplissent graduellement les espaces entre les grains de ciment.
- Les pores de gel ne sont pas représentés (trop petits !) et les bulles d'air sont trop grandes pour apparaître sur cette figure.

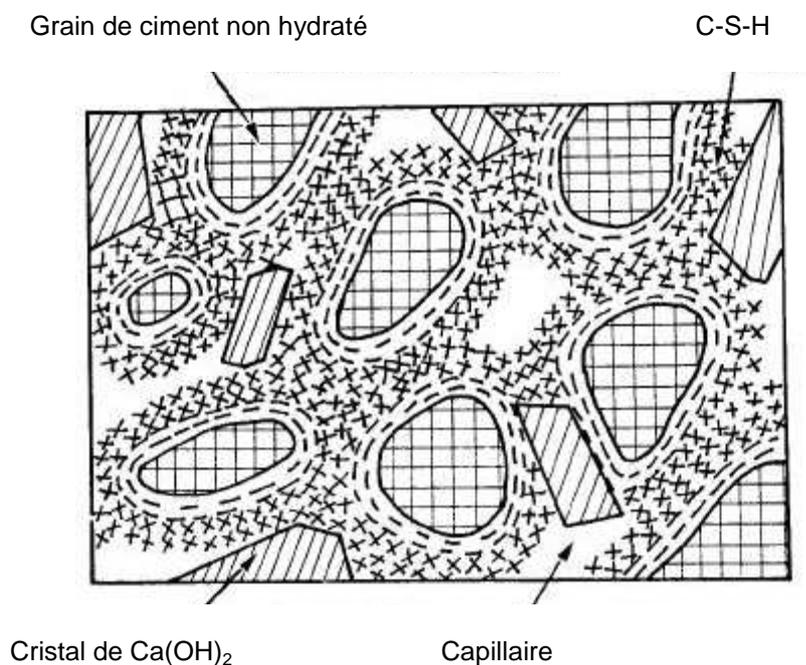


Figure I-1 : Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté (Pigeon 1981).

I.2.2 Microstructure de la pate de ciment hydratée

Les produits de l'hydratation des silicates de calcium sont des silicates de calcium hydratés de formules chimiques variables ($x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) notés C-S-H et la portlandite ($\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$) (CH en notation cimentière). Les produits des phases aluminées sont, en présence de gypse, l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaOSO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, notée AFt) et le monosulfoaluminate de calcium ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaOSO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$, notée AFm) (voir figure I-2). La consommation des sulfates lors de la formation des AFt et AFm implique que les alcalins sont présents sous forme de soude ou de potasse solubles dans la solution interstitielle.

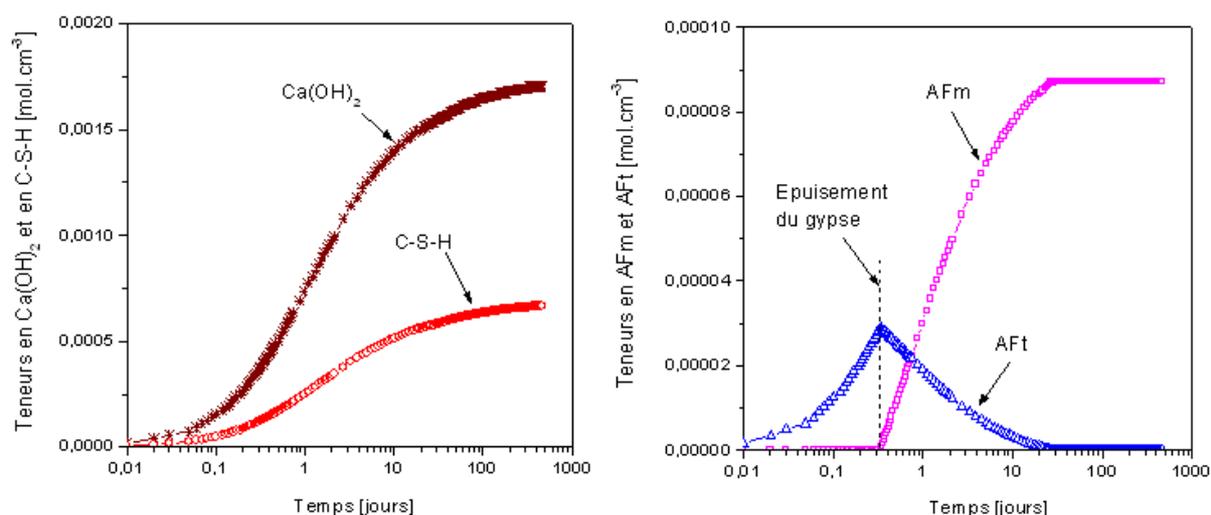


Figure I-2 : Teneurs en Ca(OH)_2 , C-S-H, AFt et AFm en fonction du temps pour le béton ordinaire (Papadakis, 1991).

I.2.2.1 Silicates de calcium hydratés (C-S-H)

Les hydrates les plus importants sont les C-S-H, ils sont de formes minéralogiques stables, quasi-insolubles. et représentent les parties majoritaires des hydrates dans la pâte de ciment hydraté (50 à 70%), il s'agit d'un gel qui influence en grande partie la plupart des propriétés de la pate, notamment mécaniques et de durabilité.

Le gel de C-S-H est poreux, sa porosité représente environ 28% du volume total du gel. Les pores de gel, sont en fait les espaces qui contiennent de l'eau adsorbée sur les surfaces entre les feuilletts. Ils sont de tailles très petites (20 Å à 30 Å) (Figure I-3).

- L'eau des pores de gel n'est pas "libre" car elle est fortement retenue sur les feuilletts par des forces de surface. Puisque les pores de gel sont extrêmement fins, ils contribuent très peu à la perméabilité de la pâte et du béton.

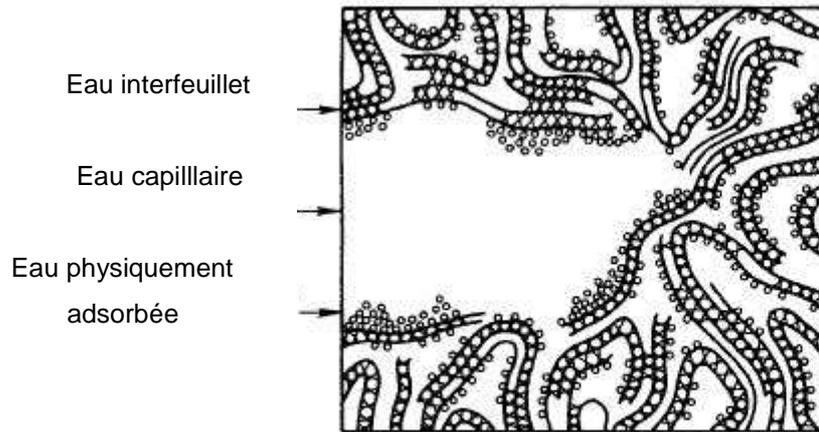
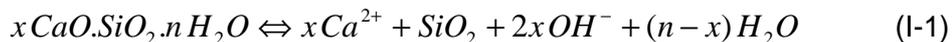


Figure I-3 : Représentation schématique du C-S-H et de l'état de l'eau qui y est associé. (Metha, 1986).

Les C-S-H jouent le rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour former un matériau rigide. Cette cohésion des C-S-H est due, en partie, aux forces de Van der Waals entre les particules colloïdales des C-S-H.

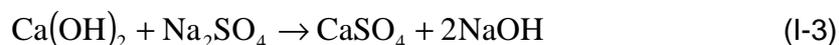
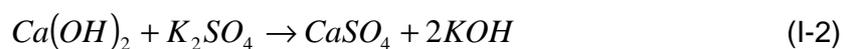
A l'équilibre (équation I-1), le pH de la solution contenant les C-S-H est très alcalin et est voisin de 12,5. Les C-S-H sont des phases peu cristallisées dont l'équilibre en solution est complexe.



À des pH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions Ca^{2+} . Les C-S-H subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques.

I.2.2.2 L'hydroxyde de calcium ou portlandite (CH)

Très tôt après le coulage, le pH de la solution interstitielle des bétons se situe aux environs de 13,5. Lors des réactions d'hydratation, les silicates réagissent avec l'eau pour donner des hydrates (C-S-H) et la portlandite ($Ca(OH)_2$) légèrement soluble. Cette portlandite réagit avec les sulfates alcalins présents dans le ciment pour donner les hydroxydes correspondants :



Le pH élevé est dû à la présence des ions OH^- provenant des bases alcalines et de la chaux dont la solubilité dépend précisément de la concentration en ions OH^- . Au bout de quelques heures, la solution interstitielle s'enrichit progressivement en bases alcalines NaOH et surtout KOH, alors que la concentration en chaux décroît et devient négligeable à long terme: ceci explique que le pH reste supérieur à 13 alors qu'une solution saturée de chaux n'a qu'un pH de 12,5.

La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est un minéral stable en milieu basique. Elle se forme par précipitation dans l'espace poreux de la pâte de ciment. Elle représente 25 à 27 % de la pâte d'un ciment durci, et n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique, ses cristaux de taille importante sont susceptibles de limiter la résistance en compression du béton.

L'équilibre chimique de la portlandite dans un milieu cimentaire sans présence d'alcalins s'établit à un pH très basique, de l'ordre de 12,4 et la concentration en calcium (21 mmol/kg) de la solution interstitielle s'écrit par l'équilibre suivant :



En présence d'alcalins (Na^+ , K^+), ces éléments fixent le pH de la solution interstitielle entre 13,5 et 14. La portlandite fixe alors uniquement la concentration totale en calcium en solution. L'équilibre de la portlandite (équation I-4) indique que cette concentration décroît de manière significative avec la hausse du pH.

Grace à la présence de la chaux qui va en partie se trouver en équilibre de dissolution précipitation dans le réseau poreux rempli de l'eau de gâchage en excès qu'il sera possible de noyer les armatures d'acier dans la solution interstitielle du béton qui va passiver les aciers et inhiber leur corrosion.

De plus, la portlandite est très sensible à un abaissement du pH de la solution interstitielle et, du fait de sa grande solubilité (solubilité 1,4 g/l), se dissout pour compenser le départ de certains ions surtout le calcium lors d'une agression chimique. Des essais expérimentaux (Chaussadent, 2000) sur une pâte de ciment ont montré que la seule dissolution de la portlandite conduit à diviser par deux le module de Young de la pâte de ciment, ce qui a pour conséquence une diminution de la durabilité d'un béton.

I.2.2.3 Les sulfoaluminates de calcium (AFt et AFm)

Ces hydrates sont minoritaires et occupent 15 à 20 % du volume solide de la pâte de ciment hydraté. On les retrouve généralement sous deux formes :

- Ettringite (trisulfoaluminates).aiguilles prismatiques
- Monosulfoaluminates (plaquettes hexagonales).

L'ettringite est le seul minéral ternaire stable dans le système, par contre le monosulfoaluminate même dans les conditions normales n'est pas une forme stable et participe peu au développement de la résistance.

Par ailleurs la coexistence de ces deux minéraux contrôle la teneur en aluminat et sulfate en solution à de faibles teneurs.

I.2.2.4 La solution interstitielle

Lors de l'hydratation, l'eau de gâchage se charge en ions. Ces ions ont pour origine les anhydres qui se sont dissous : C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF et gypse. La précipitation des hydrates se produit suivant des processus de germination et croissance de cristaux, en fonction de la concentration des ions de cette solution aqueuse, nommée dans la pâte de ciment hydratée la solution interstitielle.

La composition de la solution interstitielle pour une pâte de ciment hydratée se caractérise par une forte concentration en alcalins (de l'ordre de 100 à 300mmol.l⁻¹), un pH très élevé (>13, 5 en présence d'alcalins) et une concentration en calcium assez faible (1mmol.l⁻¹).

I.2.3 L'état de l'eau et son influence sur la structure du béton

L'eau étant constitutive du matériau, il est parfois difficile d'évaluer le degré de liaison de l'eau avec la matrice solide. Dans la pâte de ciment hydraté, on retrouve de l'eau sous différentes formes, trois degrés peuvent être distingués :

- l'eau chimiquement liée : c'est l'eau consommée au cours des réactions d'hydratation, combinée avec d'autres composants dans les hydrates ;
- l'eau adsorbée : c'est l'eau fixée à la surface de la matrice solide sous l'action de forces intermoléculaires de type force de Van der Waals, (§ II.4.1.1.) ;
- l'eau capillaire et l'eau libre : l'eau capillaire est l'eau en phase condensée en phase condensée remplissant un capillaire sous l'effet de la condensation capillaire (§ II.4.1.2.)

Un cas particulier de l'eau capillaire est l'eau libre contenue dans les pores les plus gros et qui ne subit pas d'influence particulière des forces superficielles (elle est en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire d'une interface plane).

En fait, l'eau interviendra différemment dans les processus liés à la durabilité, en fonction de sa localisation et de son état.

I.2.4 Structure de la porosité du béton

I.2.4.1 Porosité et description du réseau poreux

Lors de l'hydratation du ciment, les différents hydrates se forment et se développent dans les espaces situés entre les grains de ciment anhydre initiaux. Ce mode de remplissage des vides originels crée un réseau poreux très complexe (Baroghel, 1994). Le réseau poreux ^[1] d'un matériau cimentaire recouvre une large gamme d'échelles (du picomètre au centimètre).

Les pores sont couramment répertoriés en deux catégories :

➤ Les pores « capillaires », vestiges des espaces intergranulaires de la pâte fraîche. Ils sont directement liés au rapport E/C et sont détectables par prosimétrie mercure, ils ont une taille de pores comprise entre 0,1 et 10 μm . Cette porosité occupe jusqu'à 30% du volume d'une pâte de ciment pour le cas d'un rapport E/C = 0,65 (Verbeck, 2005).

➤ Les pores relatifs aux hydrates, inter et intra-cristallites (ou espaces inter-feuillets) et en particulier les C-S-H (Baroghel, 1994). Ils sont inhérents à la formation des hydrates et indépendants du rapport E/C, et sont nettement plus petits que les précédents 0,1 à 10 nm (essai prosimètre). A cette échelle, les effets surfaciques tels la pression capillaire ou l'absorption dans les pores sont prépondérants devant les phénomènes de transport tels que le transport diffusif. Powers a évalué à 28% la porosité comprise au sein du gel de C – S – H (Powers, 1960).

A ces deux familles de taille de pores, les vides dus aux bulles d'air ^[2], et les fissures (diamètre supérieur à 1 μm) sont à ajouter (voir Figure I-4).

[1] pour caractériser un milieu poreux l'utilisation conjointe de différents outils d'étude tels que la porosimétrie par intrusion de mercure ou encore la porosité totale à l'eau sont utilisés.

[2] Les vides provenant de l'air occlus pendant le malaxage ou l'air entraîné par un adjuvant, ayant peu d'importance au regard des transferts hydriques.

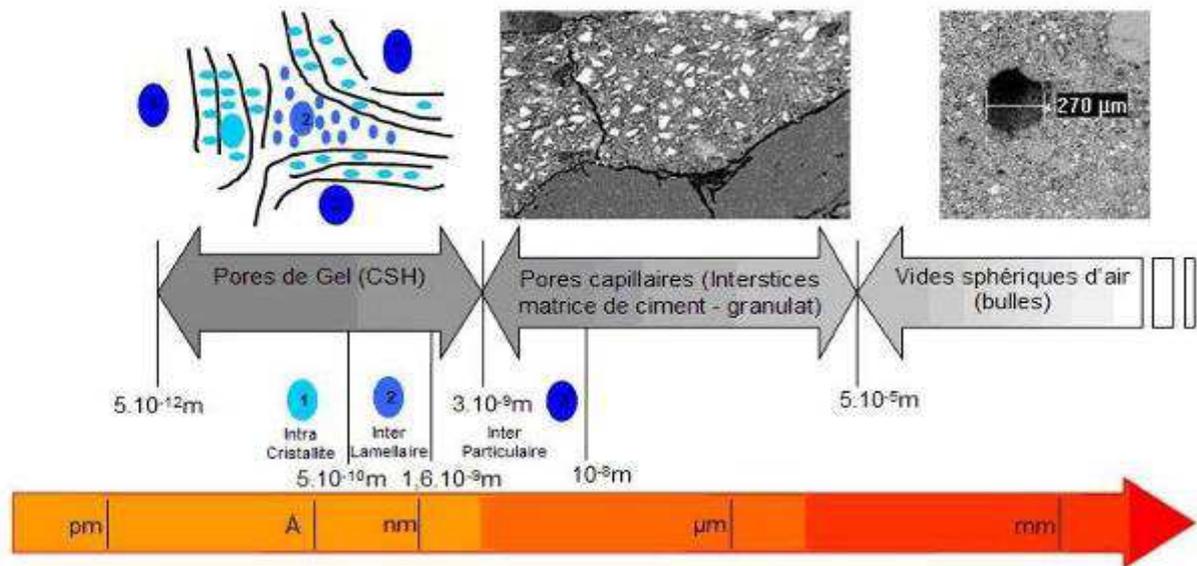


Figure I-4 : Echelle des porosités des matériaux cimentaires (Delmas, 2006).

Lorsque les vides communiquent entre eux, il s'agit d'une porosité ouverte (ou libre). Lorsque les vides sont isolés, c'est une porosité occluse ou fermée (Figure I-5).

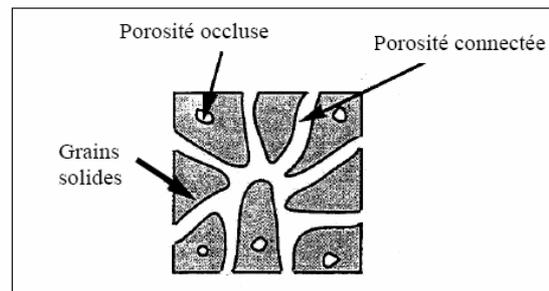


Figure I – 5 : Représentation schématique d'un milieu poreux

Dans cette étude, seule la porosité « ouverte » du béton nous intéresse. Elle est aussi appelée « porosité accessible à l'eau ». La porosité d'un béton courant est généralement supérieure à 10%.

Cependant, différents niveaux de connectivité peuvent exister pour un pore :

- interconnecté
- aveugle (bras mort)
- isolé.

Les pores interconnectés permettent le transport de matières dans le matériau, contrairement aux pores aveugles ou aux pores isolés.

De plus, la présence de porosités, principalement interconnectées, permet aux agents potentiellement agressifs de pénétrer plus facilement à l'intérieur du matériau et donc d'atteindre rapidement les zones saines. Une porosité élevée du matériau permet donc une avance rapide du front de dégradation.

I.2.4.2 Caractérisation de la porosité

La structure poreuse de la pâte de ciment hydraté et du béton durci peut être caractérisée à travers des paramètres tels que la porosité, la distribution de la taille des pores, la connectivité ou la tortuosité des pores. Ces paramètres influencent aussi bien les propriétés mécaniques que la durabilité du béton par l'intermédiaire des propriétés de transferts.

Dans le but de mieux appréhender les chemins d'écoulement, il convient de préciser les notions suivantes :

i) Porosité

Nous rappelons que la porosité (p) d'un matériau poreux est défini comme étant la fraction de volume total occupée par les vides. Si V_t est le volume total de l'échantillon, V_p le volume poreux ou le volume des vides et V_s le volume réel de la phase solide, on a alors :

$$P = \frac{V_p}{V_t} \quad (I-5)$$

$$P(\%) = \frac{V_p}{V_t} \cdot 100 = \frac{(V_t - V_s)}{V_t} \cdot 100 \quad (I-6)$$

Le paramètre précédemment défini est une caractéristique macroscopique du milieu poreux, mais ce paramètre est limité pour expliquer les phénomènes physiques et certains résultats expérimentaux. C'est la raison pour laquelle on définit des caractéristiques microscopiques du milieu poreux comme la tortuosité et la connectivité, qui viennent en supplément de la formulation macroscopique.

ii) Tortuosité

La tortuosité (τ) caractérise le chemin d'écoulement d'un fluide à travers le réseau Poreux, elle est défini comme étant le rapport entre le chemin effectivement parcouru par le

fluide (longueur effective d'écoulement : L_e) et la distance entre les points aval et amont (longueur d'écoulement apparente : L) du milieu considéré (Figure I-6).

$$\tau = \left(\frac{L_e}{L} \right)^2 \quad (I-7)$$

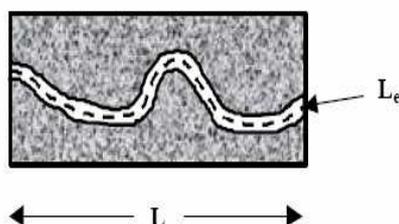


Figure I – 6 : Longueur moyenne d'un pore par rapport à la longueur d'un échantillon.

Un matériau poreux constitué d'un réseau de pores fortement tortueux et discontinu est généralement très imperméable aux agents agressifs.

Pour un type de configuration donné la tortuosité peut être reliée à la porosité :

$$\tau = \frac{1}{\varepsilon \cdot F} \quad (I-8)$$

Avec τ est la tortuosité, ε la porosité totale et F présenté par les géologues sous l'appellation de facteur de formation (Daian, 1999).

Cependant, Il existe un grand nombre de techniques expérimentales permettant d'évaluer (indirectement) la tortuosité (ou le facteur de formation) : signalons notamment les essais de diffusion d'ions (Cl^- principalement) en régimes stationnaires ou non stationnaire, la migration d'ions sous champ électrique, l'essai de diffusion de l'eau tritiée et les mesures de conductivité électriques (sous courant continu ou alternatif). Toutefois, ces méthodes présentent entre elles de grandes disparités comme l'a montré Daian (1999) et une valeur de tortuosité doit toujours être assortie du mode opératoire utilisé pour sa détermination.

iii) Connectivité

La connectivité C , est un paramètre topologique qui mesure le degré d'interconnexion d'un milieu poreux (description de Cairns, puis de Fischermeister, rapportée par Dullien (1979)). En général il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possible car le degré d'interconnexion y est plus faible (Quenard,1999). La perméabilité de la pate s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a moins de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs. Ce paramètre est défini grâce à la relation suivante :

$$C = b - n + 1 \quad (I-9)$$

Avec : b : Nombre de branches (ou d'orifices d'une cavité).

n : Nombre de nœuds (ou de cavité).

I.2.4.3 Interface pâte-granulats

Dans un béton, la liaison qui s'établit au cours de l'hydratation entre la pâte de ciment et les matériaux qu'elle enrobe, se traduit par une zone de pâte particulière appelée « auréole de transition » ou interface pâte-granulat (Maso, 1980 citée par Djerbi, 2007). Son épaisseur augmente avec la taille du granulats mais est toujours inférieure à 50 micromètre. Dans cette zone, la pâte de ciment présente une cohésion plus faible, due à un excès local d'eau, car au moment du gâchage, un film liquide s'adsorbe sur la surface du granulats. Tant du point de vue mécanique que du point de vue de la durabilité ou de la perméabilité, ces zones constituent les « maillons faibles » du matériau (Buil, 1992). La porosité importante que présente cette zone par rapport au reste de la pâte, devient un chemin privilégié pour le transport de masse.

I.3 AJOUT CIMENTAIRE

Les matériaux de Pozzolanique, tels que la fumée de silice, les cendres volantes, et laitiers de haut fourneau sont maintenant largement admis en tant qu'ingrédients valables pour le béton durable. ces ajouts cimentaire qui, comme le ciment portland, ont des propriétés liantes. Ils réagissent avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) libéré par les silicates de calcium pour former de nouveaux C-S-H. Cette réaction s'appelle réaction pouzzolanique.

Les C-S-H issus de la réaction pouzzolanique se présentent essentiellement sous la forme de particules spatiales. De façon générale, le rapport C/S de ces C-S-H est compris entre 0,9 et 1,3.

Les pouzzolanes sont utilisées en combinaison avec le ciment portland et modifient les propriétés du béton frais et durci en raison de leurs propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques.

Vu que la fumée de silice a été utilisée dans notre programme de recherche (voir partie expérimentale), une description rapide de cette dernière est présentée.

I.3.1 La fumée de silice

Les particules de fumée de silice sont en moyenne 100 fois plus petites que les grains de ciment. Leur surface spécifique varie entre 13000 et 30000 m^2/kg et leur densité se situe entre 2,00 et 2,25. Ces particules ont une structure vitreuse, ce qui en fait un produit hautement pouzzolanique. Elles sont utilisées en remplacement du ciment et sont souvent utilisées dans les bétons à haute performance.

I.3.2 Influence de la fumée de silice sur la perméabilité

Plusieurs chercheurs reconnaissent que la fumée de silice réduit de façon significative la perméabilité d'une pâte de ciment. L'effet le plus connu est le raffinement de la structure poreuse.

Selon Sellevold (1983) cité par Djerbi (2007), la réduction prononcée de la taille des pores contenus dans les bétons avec fumée de silice est attribuable à deux caractéristiques de cet ajout minéral. Premièrement, sa haute réactivité pouzzolanique permet de développer plus rapidement un réseau de pores discontinu. Deuxièmement, les particules de silice agissent comme des sites de nucléation pour les C-S-H, permettant ainsi une meilleure distribution spatiale des hydrates. Par ailleurs, dans les bétons à faible rapport eau/liant et à fort dosage en superplastifiant, la petite taille de ces particules permet de remplir efficacement l'espace entre les grains, réduisant ainsi la quantité d'eau requise pour obtenir une bonne maniabilité.

Selon Mehta et col. (1980), les ajouts minéraux en général causent le raffinement de la structure poreuse de la pâte de ciment. Delage et Aïtcin (1983) via Mindess et col. (1985) ont montré que l'addition de fumée de silice causait une diminution du diamètre moyen des pores d'un facteur 10.

Selon Young (1988) cité par Quang (2007), la diminution prononcée de la perméabilité à l'eau en présence de la fumée de silice est surtout remarquable pour des rapports eau/ciment élevés, probablement à cause du phénomène de la meilleure répartition spatiale des hydrates qui est particulièrement prononcé dans ces bétons. Selon Mindess et col. (1985), la fumée de silice provoque aussi une amélioration à l'interface pâte-granulats, entre autres en augmentant la résistance à la fissuration de cette zone particulièrement sensible, conduisant ainsi à une diminution de la perméabilité. De plus, la fumée de silice réduit le ressuage, ce qui a un effet positif.

I.3.3 Influence de la fumée de silice sur la pénétration des ions chlore

Cabrera et Claisse (1990) mentionnent que lors de l'essai de perméabilité aux ions chlore sur des bétons contenant de la fumée de silice, la charge est transmise par les ions hydroxyles, tandis que dans des bétons usuels très poreux, ce sont les ions chlore qui transmettent le courant.

Selon Laplante et col. (1991), la fumée de silice produit une diminution de la charge passant dans le béton et ceci jusqu'à un facteur 1000 dans des conditions optimales. Les recherches de Cabrera et de Claisse [Cabrera, 1990] démontrent à peu près les mêmes résultats.

Selon Perraton et col. (1988), l'utilisation de la fumée de silice en remplacement de 5 à 10% de la quantité de ciment, semble diminuer la charge passant tel que l'illustre la figure I-7. A plus de 10%, le remplacement devient inutile. Le raffinement de la porosité dû à la fumée de silice est probablement la cause d'une telle réduction de charge. A cela s'ajoute la réduction de la quantité d'ions libres dans la solution interstitielle, car la réaction pouzzolanique piège les alcalins, Na et K.

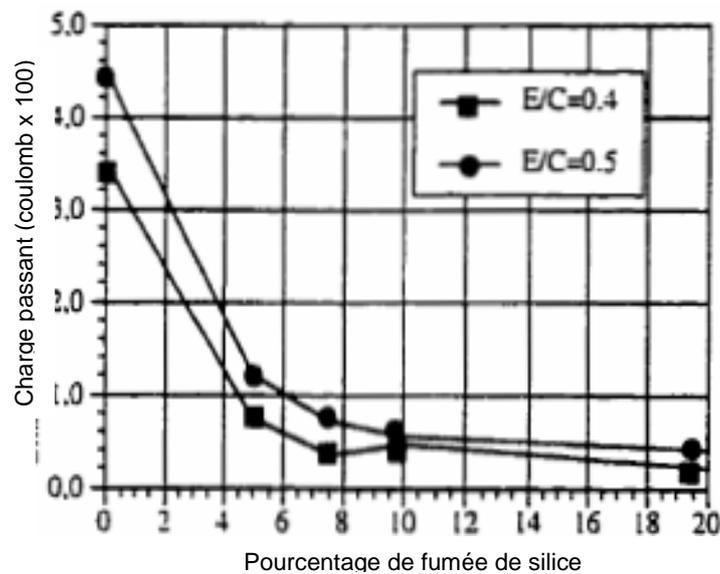


Figure I-7 : perméabilité aux ions chlore en fonction du dosage en fumée de silice, tirée de Perraton et col. (1988).

I.4 CONCLUSION

Les matériaux cimentaires sont des matériaux composites hétérogènes dont la structure des bétons présente une porosité importante. La structure de leur réseau poreux permet la pénétration d'agents extérieurs agressifs vers le cœur du matériau. Dans le cas de la dégradation des matériaux cimentaires, ces agents extérieurs peuvent être des éléments composés chimiques.

Dans cette partie, nous avons fait un bilan sur les connaissances générales concernant les matrices cimentaires, en développant les caractéristiques chimiques et minéralogiques des différents hydrates de la pâte de ciment durcie, ainsi que les différents types et dimensions des pores présents dans la matrice.

Dans ce qui va suivre, nous nous intéresserons aux études existantes portant sur l'attaque des matrices cimentaires par les milieux agressifs, principalement les ions chlorure.