

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Conception du béton des ouvrages hydrauliques, notions théoriques et travaux pratiques.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : P 624.18 HAD

APA Citation (توثيق APA):

Hadj Sadok, Ahmed. (2020). Conception du béton des ouvrages hydrauliques, notions théoriques et travaux pratiques [polycopie pédagogique]. ENSH.

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

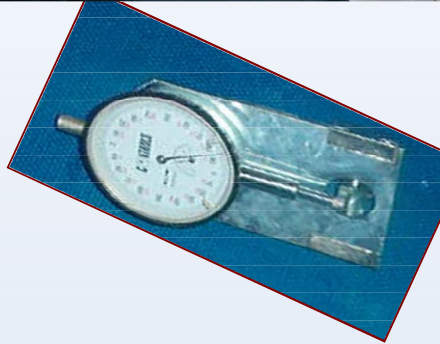
Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم لإنتاج لأساتذة باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (طروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات الدوريات، كتب...) بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



CONCEPTION DU BETON DES OUVRAGES HYDRAULIQUES : Notions théoriques et Travaux pratiques

Par

Dr Ahmed HADJ SADOK

Sommaire

Introduction	02
Chapitre 1 : Le Ciment : Hydratation et microstructure	04
1.1 La fabrication du ciment.....	04
1.2 Composition du ciment.....	06
1.3 Hydratation du ciment.....	06
Chapitre 2 : Propriétés d'étanchéité du béton	10
2.1 Structure poreuse de la matrice cimentaire du béton	11
2.2 La porosité du béton	13
2.3 La perméabilité du béton	14
2.4 Absorption d'eau par capillaire (Capillarité).....	18
Chapitre 3. Fissuration du béton : type et origine	20
3.1 Typologie des fissures.....	20
3.2 Origine des fissures du béton.....	20
3.2.1 Déformation du retrait du béton.....	21
3.2.2 Agression physico-chimiques.....	25
Chapitre 4 : Composition des bétons des ouvrages hydrauliques	29
4.1 Spécifications du béton des ouvrages hydrauliques.....	29
4.2 Influence des paramètres de la composition du béton.....	31
4.2.1 Le ciment : Type et dosage.....	31
4.2.2 Le rapport E/C.....	33
4.2.3 Les adjuvants.....	36
4.2.4 Les additions minérales.....	38
Chapitre 5 : Travaux Pratiques	40
TP N°1 : Conception d'un béton destiné aux ouvrages hydrauliques.....	41
I.1 Formulations du béton.....	41
I.2 Préparation du béton.....	42
I.3 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump test).....	43
I.4 Confection des éprouvettes.....	43
I.5 Présentation des résultats du TP, commentaires et conclusion.....	44
TP N°2 : Mesure des propriétés d'étanchéité des bétons.....	45
II.1 Absorption d'eau par capillarité.....	45
II.2 Essai de pénétration d'eau sous pression.....	47
II.3 Essai de porosité totale à l'eau.....	48
II.4 Présentation des résultats du TP, commentaires et conclusion.....	48
TP N°3 : Essais Non Destructifs sur béton.....	49
Références Bibliographiques	54

Introduction

Les ouvrages hydrauliques, appelés aussi ouvrages hydrotechniques tel que les barrages (Digues et ouvrages annexes en béton), les stations de traitement d'eau ou d'épuration, les réservoirs ou encore les ouvrages maritimes, sont des ouvrages stratégiques qui sont construits pour durer dans le temps et résister aux différentes contraintes structurelles et environnementales. La particularité majeure de ces structures est leur lien étroit avec le milieu aqueux. En effet, les matériaux constitutifs des ouvrages hydrauliques, notamment le béton armé sont en contact quasi permanent avec l'eau, soit en grande quantité s'accompagnant d'une pression importante, ou en faible quantité et pénètre dans le béton par remontée capillaire. Dans les deux cas, sachant que tous les mécanismes de détérioration du béton requièrent la présence d'eau et/ou autres espèces nocives, la présence d'eau dans le réseau capillaire conduit à une mauvaise durabilité du béton durci. Par ailleurs, l'eau peut être neutre ou, le cas échéant chargée d'agents chimiquement agressifs (Ions de chlore, ions de sulfate, acides, etc.) pouvant altérer les propriétés vitales du matériau. Ces altérations peuvent aller d'un simple écaillage superficiel, jusqu'à des pathologies beaucoup plus graves et destructives tel qu'une fissuration profonde conduisant à une perte de résistance ou de l'étanchéité du matériau. Par ailleurs, le béton au courant de sa vie, peut être sujet de fissuration émanant de plusieurs causes relatives à des actions physiques, chimiques, thermiques ou structurelles. Ces actions sont dépendantes à l'évolution structurelle du béton qui est-elle même reliée à l'hydratation du ciment dans le temps et des conditions de l'environnement extérieur (température, hygrométrie, agressions chimiques, ...).

Tous ces facteurs, conduisent à des exigences très particulières de la qualité du béton qui est d'une part, le matériau étanche de l'ouvrage et d'autre part, le bouclier protecteur des armatures assurant la stabilité structurelle des éléments minces des ouvrages en question. Ces exigences, touchent les propriétés essentielles du béton qu'elles soient mécaniques (Résistance à la compression et à la traction), physiques (Porosité, perméabilité, capillarité, ...) ou chimiques (Stabilité face à des agressions chimiques).

Ce manuel, regroupe d'une part diverses informations scientifiques au tour de la conception du béton des ouvrages hydrauliques et, d'autre part traite quelques pathologies courantes de ces ouvrages influençant directement la qualité du béton et ces missions de service. Par ailleurs, des travaux pratiques, permettant de mettre en avant les notions théoriques exposées, sont présentés. Ainsi, le manuel a été conçu pour :

- Les étudiants de deuxième année, second cycle (quatrième année), leurs servirons comme un support de cours théorique d'une part, et d'autre part d'un recueil des travaux pratiques à réalisés au laboratoire en présentiel,
- Les étudiants en fin de cycle de toutes les spécialités, préparant leur projet de fin d'étude ou de master touchant directement ou indirectement à des ouvrages hydrauliques de stockages ou de transfères. Ces derniers rencontrent souvent des difficultés à trouver les informations nécessaires relatives à l'aspect conception et propriétés du matériau béton utilisé.

Chapitre 1 : Le ciment : Composition, type et hydratation

Le ciment représente le noyau central du matériau béton. Il influence pratiquement toutes les propriétés du béton, à tous ses états, frais ou durci. La bonne compréhension ainsi que la maîtrise du matériau ciment, présentes des outils de taille dans la conception du béton selon des spécifications particulières, cas des bétons d'ouvrages hydrotechniques. Dans ce premier chapitre, des notions succinctes seront données sur les différents types de ciment et de sa composition. Des notions sur l'hydratation et la microstructure du ciment seront par ailleurs mis en exergue.

1.1 La fabrication du ciment

Le produit de base du ciment est le clinker qui est considéré comme étant un liant hydraulique composé chimiquement de silicates et d'aluminates de calcium. Ces derniers sont issus eux même de combinaisons de différents oxydes : CaO (la chaux), SiO₂ (la silice), Al₂O₃ (l'alumine) et Fe₂O₃ (l'oxyde de fer). Ces oxydes sous forme de minéraux constitués à partir des matières premières (Calcaire et argile) qui contiennent par ailleurs d'autres éléments tels que la magnésie, les sulfates, les sulfures et les alcalins (K₂O et Na₂O), dans des taux limités.

La figure 1.1 résume les différentes étapes de la fabrication du ciment qui sont résumées comme suit :

- **Extraction et concassage** des matières premières (calcaire et argile) : le concassage est réalisé dans le but de limiter la granulométrie de la matière première à 100 mm au maximum.
- **Mélange et homogénéisation** de l'argile et du calcaire. Les proportions sont proches de 80 % de calcaire et de 20% d'argile.
- **Préparation du cru** : Réalisée soit par la voie humide ou par la voie sèche. La voie sèche est la plus utilisée en Algérie et permet de réduire la consommation d'énergie.
- **Cuisson du cru** à une température de 1450°C : Réalisée dans des fours rotatifs, elle permet de transformer le cru en clinker ;
- **Refroidissement** du Clinker jusqu'à 100°C.
- **Broyage du clinker** : Dans cette étape le gypse et éventuellement les ajouts cimentaires (Calcaire, laitier, pouzzolane Cendres volantes...), sont ajoutés. Ainsi les différents types de ciment sont obtenus.

Les cimenteries commercialisent différents types de ciments pour de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction, relatifs à une résistance particulière suite à une attaque physique ou chimique ou pour répondre à des exigences mécaniques spécifique. La diversité des ciments peut même apporter des solutions face à une mise en œuvre particulière du béton. Le tableau 1.1 présente les compositions des divers types de ciments courants. Pour

les ciments, on distingue trois classes de résistances ; 32.5 - 42.5 - 52.5, définis par leur valeur de la résistance minimale du ciment à 28 jours.

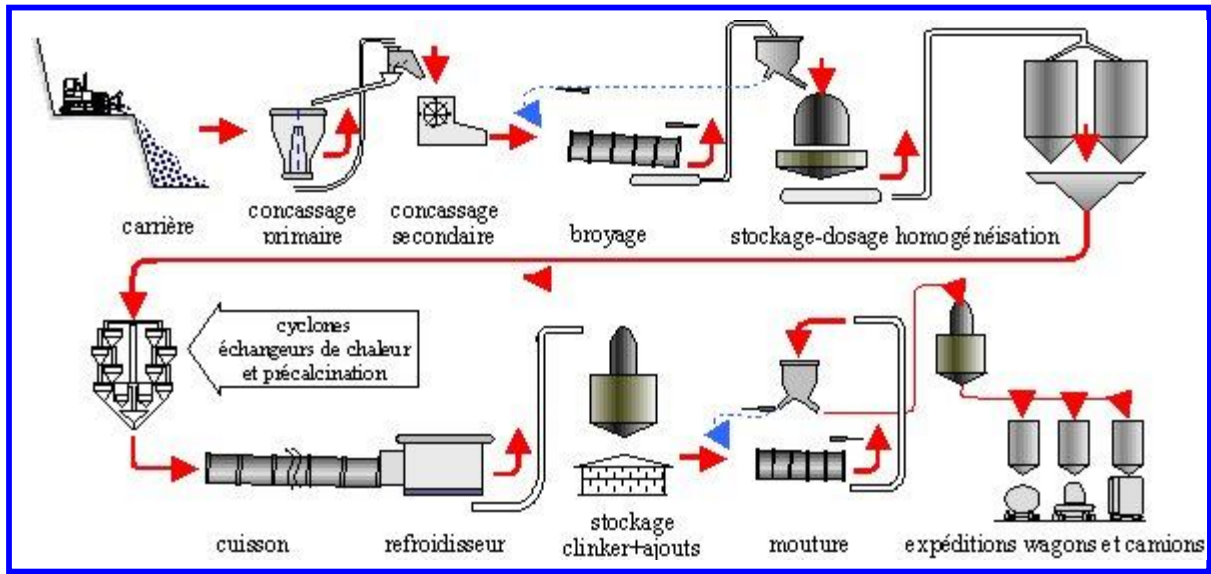


Fig. 1.1. Procédé de fabrication du ciment par la voie sèche

Tableau 1.1 : Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme EN 197-1

Désignation	Types de ciment	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivant : laitier- pouzzolane – cendre – calcaires – schistes – fumée de silice	Matière secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %		5% max
CEM II /A	Ciment portland composé	80 à 94 %	- de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans le cas de fumée de silice auquel la proportion est limitée à 0 %	
CEM II /B		65 à 79 %	- de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus	
CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64 %	35 à 65 % de laitier de haut fourneau	
CEM III/B		20 à 34 %	66 à 80 % de laitier de haut fourneau	
CEM III/C		5 à 19 %	81 à 95 % de laitier de haut fourneau	
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	10 à 35 % de pouzzolane, cendre siliceuse ou fumée de silice. Ces derniers étant limités à 10 %	
CEM IV/B		45 à 64 %	36 à 55 % comme ci-dessus	
CEM V/ A	Ciment au laitier et au cendre	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier de haut fourneau et 18 à 30 % de cendre siliceuse ou de pouzzolane	
CEM V/ B		20 à 39 %	31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	

1.2 Composition du ciment

Dans le processus de cuisson du cru, les oxydes principaux (la Chaux, la silice, l'alumine et l'oxyde de fer) issus de la matière première réagissent entre eux et forment des composés complexes, atteignant l'équilibre chimique. Après refroidissement du clinker, cet équilibre est supposé conservé et la composition minéralogique éventuelle est estimée à partir des quantités des oxydes de base dont la teneur moyenne est donnée dans le tableau 1.2. Le tableau 1.3, présente ces composés minéralogiques principaux du ciment, en nombre de quatre (04).

Tableau 1.2 : Taux moyens des oxydes de base du clinker

Oxydes constitutifs	Teneur limites (%)	Valeur moyenne (%)
CaO	60 à 69	65
SiO ₂	18 à 24	21
Al ₂ O ₃	4 à 8	6
Fe ₂ O ₃	1 à 8	3
MgO	0 à 5	2
Alcali	0 à 2	1
SO ₃	0 à 3	1

Tableau 1.3 : Composition minéralogique du clinker

Composés	Composition	Appellation abrégée
Silicate tricalcique	3 CaO.SiO ₂	C ₂ S
Silicate bicalcique	2 CaO.SiO ₂	C ₃ S
Aluminate tricalcique	3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrite tétracalcique	4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

1.3 Hydratation du ciment

La pâte de ciment hydraté se forme après un processus de réaction chimique du ciment et l'eau. Ils s'agit de réactions chimiques complexes où les composés minéralogiques du ciment C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF réagissent en donnant naissance à de nouvelles espèces insolubles, qui durcissent avec le temps. Ces réactions commencent immédiatement à la mise en contact du ciment avec l'eau de gâchage. Quelques temps après (2 à 3 heures), la pâte de ciment (ciment + eau) commence à faire prise (passage de l'état en suspension à un état solide). L'hydratation continue rapidement après les heures suivant la prise, pour arriver à la phase de durcissement. Ce phénomène continu durant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, mais une intensité de plus en plus lente.

1.3.1 Cinétique d'hydratation

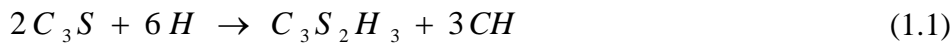
Les réactions d'hydratation du ciment représentent des processus physico-chimiques très complexes. Le mécanisme a été décrit par Le Chatelier en 1887 et explique le processus d'hydratation comme étant un mécanisme de « dissolution – précipitation – croissance ». Ce schéma, confirmé par les constatations expérimentales reste un des plus pertinents et est décrit comme suit :

Lorsqu'on de l'eau est ajoutée au ciment, les grains anhydres passeront progressivement en solution pour donner différents ions : Ca^{2+} (Ion calcium), OH^- (Ion hydroxyle), $SiO_4H_2^{2-}$, $SiO_4H_3^-$, $SiO_7H_4^{2-}$ (Ion silicates), $Al(OH)_4^-$, AlO_2^- (Ion aluminates), les SO_4^- (Ion sulfate). Ces ions sursatureront la solution interstitielle et la précipitation d'hydrates commencera. La précipitation des hydrates conduira à une réduction de la concentration des ions en solution et donc permettra à nouveau le passage en solution des grains de ciment anhydres. Ce phénomène se poursuit jusqu'à une hydratation totale.

1.3.2 Réactions de l'hydratation

i) Hydratation des silicates de calcium : C_3S et C_2S

Les silicates s'hydratent en présence de l'eau de gâchage selon les deux réactions chimiques des équations 1.1 et 1.2 :

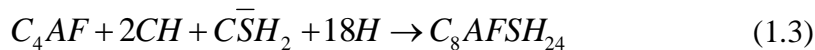


Les hydrates obtenus de ces réactions sont :

- Les silicates de calciums hydratés (CSH) ; En forme de gel, il influence considérablement la majorité des propriétés de la pâte.
- La chaux hydratée $Ca(OH)_2$ (CH) ou portlandite ; C'est des cristaux relativement instables dès que la valeur du pH descend au-dessous de 12,5. Elle participe que faiblement au développement de la résistance de la matrice.

ii) Hydratation des aluminates de calcium : C_3A et C_4AF

Une partie des $CaOH_2$ (ou CH) obtenus dans les équations (1.1 et 1.2) réagissent avec les aluminates de calcium, selon les réactions d'hydratation des équation 1.3 et 1.4 :



Où le \overline{CSH}_2 est le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

De ces réactions en ressorte un nouvel hydrate le « Tri sulfoaluminate » ou « ettringite » (C_nASH_{3n}). L'ettringite se dépose sur la surface des C_3A et forme une couche protectrice. Ce composé est généralement sous forme d'aiguilles fines enchevêtrées qui donne la forme d'un oursin. Après que le gypse soit totalement consommé, les deux équations (1.3) et (1.4) deviennent :





1.3.3 Structure interne des hydrates du ciment

Bien que la structure de la matrice cimentaire soit macroscopiquement uniforme, la morphologie des phases solides très diverses. La structure interne des hydrates du ciment conditionne incontestablement la microstructure du béton. Les hydrates des silicates du ciment (CSH et $Ca(OH)_2$) sont les plus importants dans la matrice cimentaire.

i) Les silicates de calcium hydratés CSH

Les hydrates de CSH sont formés de plusieurs types de silicates de calcium hydratés. Jusqu'à ce jour, la structure cristalline des CSH et leurs compositions chimiques sont mal définies. Lors de l'hydratation du C_3S du ciment, du fait de leur précipitation (ou germination) rapide, les CSH sont mal cristallisés et sont dans état plus tôt amorphe. Cette phase est appelée 'gel' de CSH. Le terme "Gel" indique une faible cristallisation.

Les CSH occupent environ de 50 voire 60% du volume de pâte de ciment hydratée. La morphologie des CSH est formée de fines particules de 100 à 200 Å de diamètre et caractérisée par une grande surface spécifique interne. La particule de gel est considérée comme étant une cristallite formée de lamelles composées de feuillets très minces (Figure 1.2). La précipitation des CSH recouvre progressivement les grains de ciment en leur donnant un aspect appelé "Hérisson" comme le montre la figure 1.3.

ii) La Portlandite $Ca(OH)_2$

Dans la pâte de ciment hydratée, la portlandite ($Ca(OH)_2$) occupe environ de 20 à 25% du volume des solides. Elle se cristallise en plaquettes hexagonales prismatiques (Figure 1.3) se formant entre les grains de ciment en cours d'hydratation. En raison de leur grande taille, les cristaux de portlandite ont une surface spécifique réduite ainsi que des faibles forces de liaisons d'où les faibles propriétés liantes qu'ils leur sont attribuées.

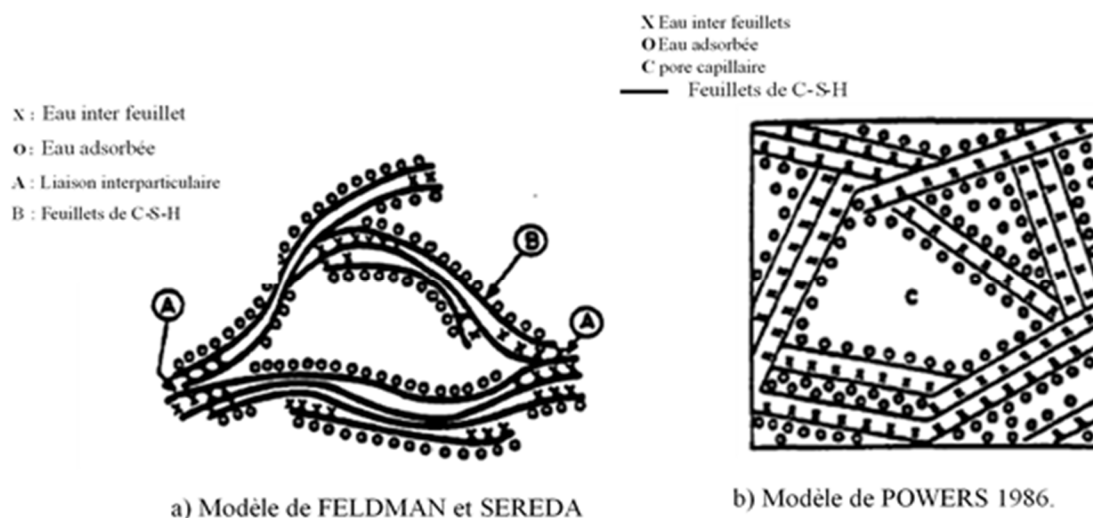
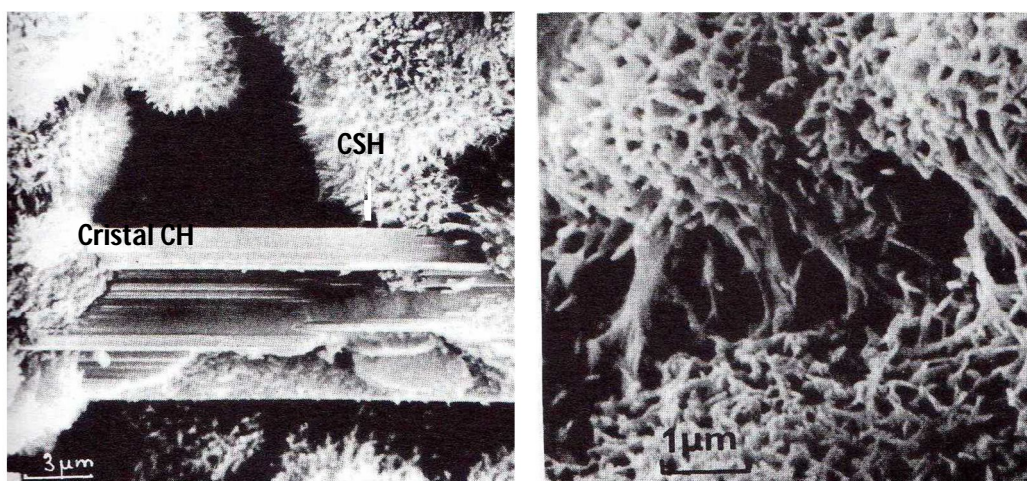


Fig. 1.2. Modèles structuraux de C-S-H



a) CSH et CH

b) Enchevêtrement des CSH

Fig. 1.3. Hydratation des C_3S produisant du gel C-S-H et des cristaux

Chapitre 2 : Microstructure et propriétés d'étanchéité du béton

L'étanchéité du béton, propriété essentielle du matériau assurant la fonction principale des ouvrages de stockage, dépend inconditionnellement de la structure des pores du béton. La porosité interne du béton ou structure poreuse, variant de par sa forme et son volume d'une matrice cimentaire du béton à une autre, se compose de :

- La porosité du matériau, dépendant de la composition du béton et des conditions de cure,
- L'état de fissuration du béton, relié à différentes contraintes structurelles ou environnementales.

L'ensemble de ces composantes représente la porte d'accès de l'eau et/ou des agents agressifs et constitue ainsi l'entité qualitative qu'on appelle Etanchéité (Figure 2.1). Si l'eau est en grande quantité (hauteur élevée), engendrant une pression hydrostatique importante sur le béton, on parle alors de pénétration d'eau sous pression ou de « perméabilité à l'eau ». Si par contre la quantité d'eau est de très faible quantité mais présente et n'engendre qu'une pression minimale, le phénomène résultant est une absorption de l'eau par le béton, dans ce cas, le mieux est de parler « d'absorption capillaire ». Ces deux propriétés néanmoins, conditionnent l'étanchéité d'un élément en béton et leur maîtrise est primordiale pour la conception d'un béton de qualité destiné aux ouvrages hydrauliques. Il en résulte que l'étanchéité du béton peut être appréciée moyennant plusieurs paramètres physiques du béton, mesurables par des essais expérimentaux de laboratoire, principalement :

- La porosité,
- La perméabilité,
- La capillarité (Absorption capillaire).

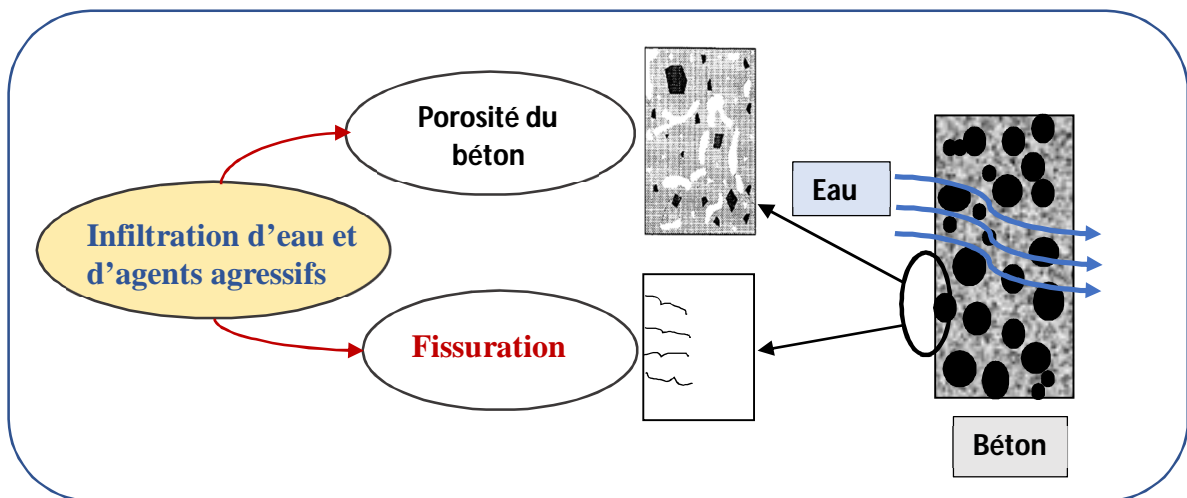


Fig. 2.1. Mode de passage d'infiltration de l'eau dans le béton

2.1 Structure poreuse de la matrice cimentaire du béton

Le béton est constitué de ciment et de différents granulats (Sables et graviers) souvent considérés comme inertes et de très faible porosité. Mélangés avec de l'eau, les particules fine (ciment et fines de sable) ayant un diamètre inférieur à 80 μm , constitue ce qu'on appelle une pâte de ciment (ou de liant). Cette pâte, appelée matrice cimentaire, une fois durcie sera la partie liante des granulats pour former le matériau béton qui avec le temps développera ses différentes propriétés physique et mécaniques. La porosité de la matrice cimentaire du béton conditionne directement la porosité du béton lui-même et par conséquent son étanchéité et sa durabilité.

D'une manière générale, un milieu poreux est composé d'un volume solide et d'un espace poreux (volume des vides). La matière solide du béton, est constituée de granulats, d'hydrates et de grains anhydres. Les pores sont remplis d'eau et/ou d'air.

2.1.1 Classification de la taille des pores

Lors de l'hydratation du ciment, nous avons pu voir que les différents hydrates se forment en se développant dans les espaces inter-granulaires du ciment anhydre. Ce mode de remplissage est la conséquence de la formation d'un réseau de pores complexe, de dimensions très variables et de forme différente. Les principaux types de pores présents dans une matrice cimentaire, montrés dans la figure 2.2, sont classés des plus petites aux plus grandes dimensions (diamètres) comme suit :

- **les pores de gel de CSH** : ces pores sont de quelques nanomètres (nm) généralement et toujours inférieure à 10-20 nm. La porosité des CSH représente environ 28% de celle de la pâte de ciment et ne dépend pas trop du rapport eau/ciment (E/C). Selon le modèle de DIEMNON et al représenté par la figure 2.3, le gel est constitué de deux types de pores : « *les pores inter-cristallites situés entre les particules de gel et les pores intra-cristallites correspondant aux espaces entre les feuillets des CSH* ».

- **les pores capillaires** (de 0,01 μm à 10 μm) : ils sont les vestiges inter-granulaires de la pâte fraîche non remplis par les hydrates. La porosité capillaire diminue progressivement avec l'évolution de l'hydratation et le diamètre moyen des pores capillaire augmente sensiblement avec l'augmentation du rapport E/C. Les transferts des fluides (liquides ou gazeux) dans le béton se fait essentiellement à travers la porosité capillaire qui affectant sa perméabilité. Les dimensions des pores, par contre, n'influence que rarement la diffusion des ions qui ont souvent un diamètre inférieur à celui des pores.

- **les macro pores** (de 10 μm à 1 mm) : ils sont associés à l'entraînement d'air (adjuvant entraineur d'air), aux défauts de compactage (vibration), à la ségrégation, etc.

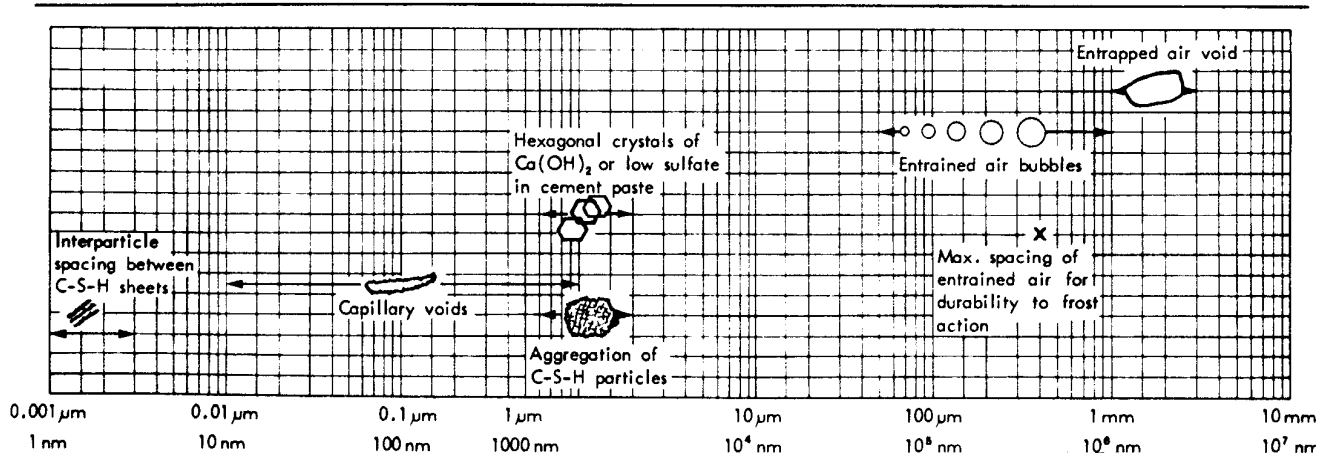


Fig. 2.2. Différentes classes des pores de la matrice cimentaire

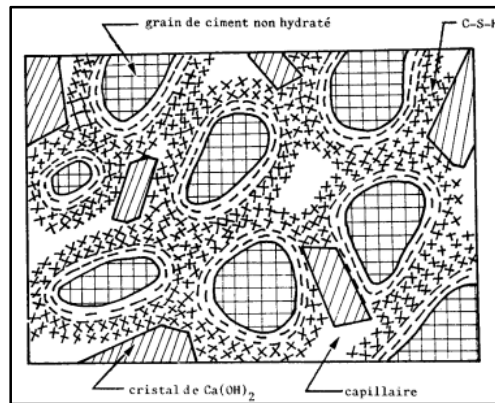


Fig. 2.3. Structure interne des hydrates du ciment (Pâte de ciment hydratée)

2.1.2 Formes géométriques des pores

Suivant leur contribution au transfert de la matière à travers la matrice cimentaire, on peut distinguer deux catégories de pores comme schématisé par la figure 2.4 :

- **Les pores interconnectés** : Il s'agit de la porosité formant un espace continu dans la matrice et pouvant donc participer au transfert des fluides.
- **Les pores isolés** : Il s'agit des pores n'ayant pas de connexion avec le milieu extérieur.

Par ailleurs, il peut y avoir une sous-catégorie de pores qui sont interconnectés d'un seul côté et aveugle de l'autre. Ces derniers sont accessibles mais ne participent pas au transport de matière à travers le béton. Les pores interconnectés et les pores aveugles forment la porosité ouverte, qui est principalement responsable de la perméabilité de la pâte du ciment durci et donc à celle du béton et de sa vulnérabilité face aux infiltrations de l'eau et des éventuels agents agressifs.

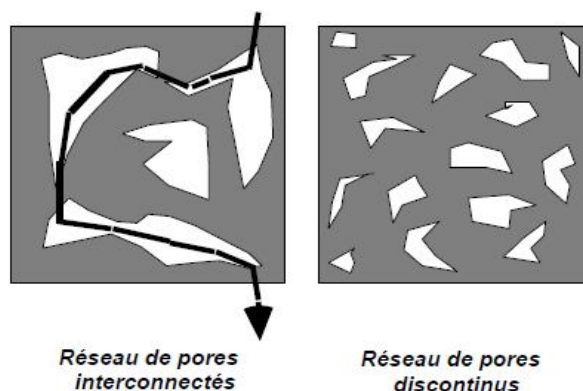


Fig. 2.4. Réseaux de pores

Pour refléter l'importance de l'interconnexion des pores, on définit un paramètre géométrique appelé « **tortuosité** » ou connectivité comme étant le degré avec lequel une structure poreuse est connectée. La tortuosité « Ti », calculée par l'équation 2.1, est définie comme étant la longueur moyenne relative que parcourt une molécule d'eau d'une rive à l'autre d'un élément poreux. Ainsi, un béton avec un réseau de pores discontinu et tortueux est habituellement très imperméable à l'eau.

$$Ti = \left(\frac{L}{L_0}\right)^2 \quad (2.1)$$

Avec :

L : longueur moyenne du parcours de la goutte d'eau,

L_0 : longueur de l'échantillon.

2.2 La porosité du béton

La porosité du béton est une propriété volumétrique définie comme étant le rapport entre le volume de vides V_v et le volume total V d'un échantillon donné (Equation 2.2). Elle représente le contenu des pores accessibles ou non accessibles, qui ne sont pas nécessairement interconnectés.

$$Po = V_v / V * 100 (\%) \quad (2.2)$$

La porosité réelle d'un béton (volume de tous les pores) est mesurée expérimentalement par des essais au laboratoire, mais reste très difficile à déterminer avec exactitude. Plusieurs essais sont proposés pour la mesure de la porosité, tel que l'essai de porosité à l'eau (saturation à pression atmosphérique ou sous vide) ou encore la porosité au mercure. Chaque méthode a ses imperfections, mais souvent elles donnent des informations assez complémentaires pour caractériser la structure poreuse de la matrice.

2.2.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau peut être mesurée par un essai d'absorption d'eau totale (par immersion). Il s'agit de calculer la différence de masses d'un échantillon à l'état sec et saturé

dans l'eau. Pour l'essai, l'échantillon d'une forme quelconque est séché à 105°C jusqu'à masse constante fixée selon la norme utilisée (Exp : variation de 0,1% après 24h). La masse sèche " M_{sec} " est ainsi déterminée.

Pour mesurer la porosité accessible à l'eau (par immersion) " P_W ", l'échantillon est immergé dans l'eau jusqu'à saturation totale (Différence de masse de 0,1% après 24 h, selon la norme NBN B 15-215). Ce dernier est pesé dans l'air " M_{sat} " et dans l'eau par pesée hydrostatique, soit " M_{eau} ". On définit P_W comme étant la porosité ouverte du matériau (Equation 2.3).

$$P_W = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{eau}} \times 100 \quad (\%) \quad (2.3)$$

N.B

Pour une estimation des vides fermés (inaccessibles) le même essai est réalisé en saturant l'échantillon sous vide, selon la norme NBN B24-213. Ce dernier est pesé à l'air " M_{satV} " et par pesée hydrostatique dans l'eau " M_{eauV} ". P_{WV} représente la porosité totale (ouverte et fermée) du matériau, calculée par l'équation 2.4. La porosité fermée peut être déduite par la différence entre P_{WV} et P_W .

$$P_{WV} = \frac{M_{satV} - M_{sec}}{M_{satV} - M_{eauV}} \times 100 \quad (\%) \quad (2.4)$$

2.2.3 Porosimétrie par intrusion de mercure

La technique de porosimétrie par intrusion de mercure représente l'un des outils majeurs de caractérisation de la structure des pores. Cette méthode est souvent employée pour caractériser la microstructure (structure interne) des matériaux poreux tels que les roches, les argiles et matériaux à base de ciment (mortier et béton, ...). Cet essai permet la quantification d'une multitude de paramètres et, particulièrement, la porosité volumique totale, le diamètre moyen et de percolation (ou critique) des pores et que la distribution des tailles des pores. Cette technique néanmoins, se base sur des hypothèses relatives à la forme et la répartition des pores.

La méthode consiste à mettre le matériau poreux sous vide, en présence d'un fluide non-mouillant (Figure 2.5). Le mercure ayant un angle de contact variant entre 117° et 145° est utilisé pour ce faire. Une pression de mercure P_{Hg} est appliquée et augmentée de façon incrémentale. Le volume cumulé de mercure (égale au volume des pores « V_p ») entrant dans les pores (de plus en plus fins) à chaque incrément est alors mesuré. A partir de là, la relation entre le volume total des pores et la pression du mercure peut être établi.



Fig. 2.5. Mouillabilité des liquides selon l'angle de contact.

La pression nécessaire pour que le mercure pénètre dans le réseau de pores est fonction de l'angle de contact (θ), de la tension superficielle du mercure et de la forme géométrique des pores. En supposant que les pores sont de forme cylindrique, le rayon moyen (r_p) des pores pénétrés par le mercure peut être relié à la pression exercée par l'équation 2.5 (Equation de WASHBURN).

$$r_p = \frac{2 \cdot \sigma_{Hg} \cdot \cos \theta}{P_{Hg}} \quad (2.5)$$

Dans laquelle :

θ : Angle de contact du mercure,

σ_{Hg} : Tension superficielle du mercure.

En utilisant Equation de WASHBURN, on peut tracer la courbe d'intrusion de mercure qui représente la variation du volume des pores, cumulé en fonction de leur rayon « $V_p = V_p(r_p)$ ». Par différentiation, on peut également obtenir la distribution des volumes des pores, logarithmique en fonction du rayon des pores « $\ln(\Delta V_p) / \ln(\Delta r_p) = f(r_p)$ » ; Cette variation met en évidence la distribution de la taille des pores ainsi que le mode poreux caractéristique (Figure 2.6). L'appareil de mesure est dit « Porosimètre à mercure » (Figure 2.7). Il permet d'accéder à des pores d'un rayon variant entre 60 μm et 3,7 nm. Les pressions usuelles de ces appareils varient de 0,001 à 200 MPa et peut aller jusqu'à 400 MPa.

Avant de lancer l'essai d'intrusion, l'échantillon doit être complètement séché de tout liquide se trouvent à l'intérieur des pores. Les méthodes les plus courantes sont l'étuvage à 105°C ou encore l'échange eau-solvant (méthanol, pentane, ...). Pour moins agresser le spécimen, un étuvage long (jusqu'à 14 jours) de l'échantillon à une faible température de 45 à 55°C est plus approprié.

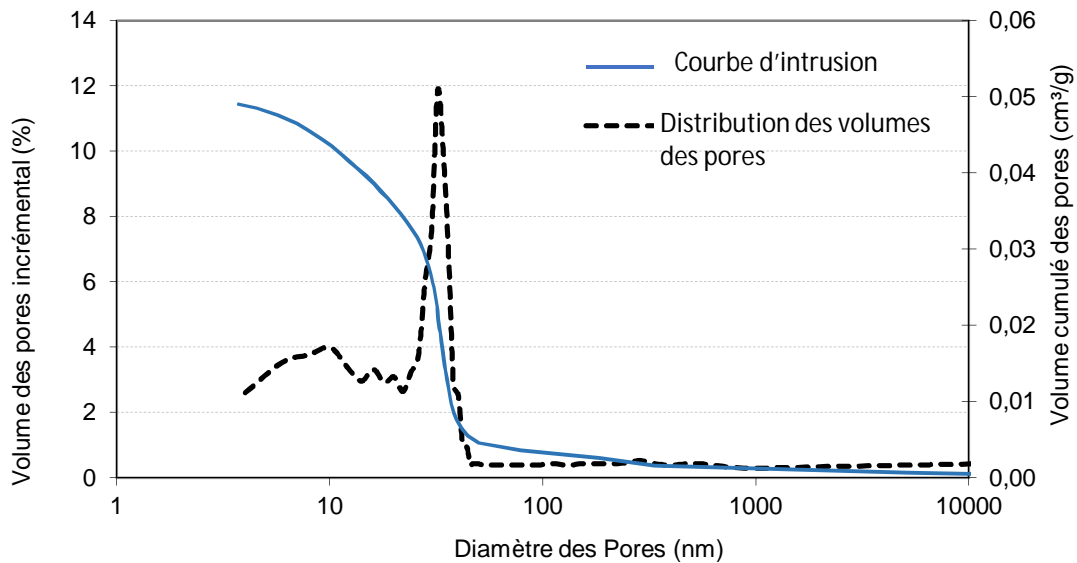


Fig. 2.6. Courbe de distribution des pores d'une matrice.

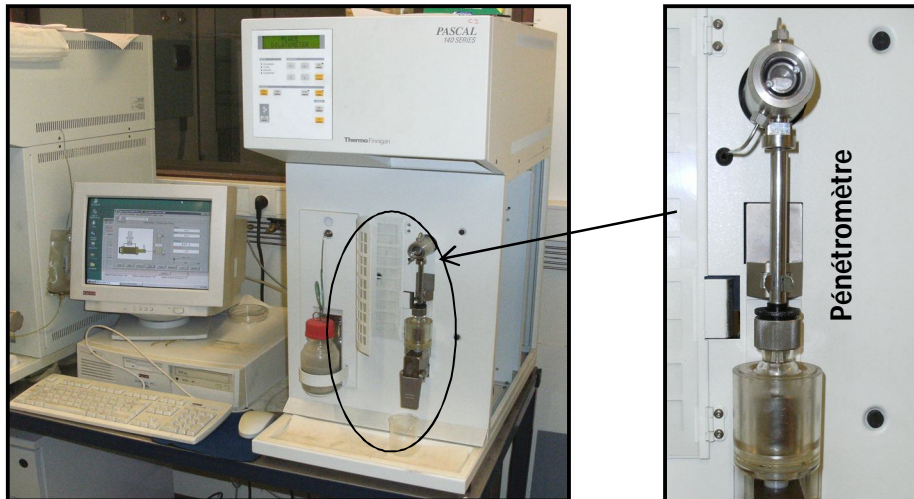


Fig. 2.7. Porosimètre à mercure.

2.3 La perméabilité du béton

La perméabilité d'un matériau donné est définie comme étant « son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz principalement) sous l'effet d'un gradient de pression ». Elle est exprimée par la relation de DARCY (Equation 2.6), applicable pour un régime d'écoulement laminaire.

Par ailleurs, la perméabilité du béton est étroitement liée aux caractéristiques du réseau de pores capillaire, principalement la porosité et la tortuosité et, le degré de saturation, si on parle de perméabilité à gaz.

$$Q = -K \cdot \frac{A}{\mu} \cdot \frac{dP}{dZ} \quad (2.6)$$

Avec :

Q : Débit du fluide de viscosité μ ,

K : coefficient de perméabilité (m^2),

A : Surface apparente de l'échantillon,

dP/dz : gradient de pression.

Plus la valeur de K est faible, plus le matériau est imperméable et inversement. Dans le cas des bétons, le coefficient de perméabilité K peut être mesuré expérimentalement par le biais de dispositifs particuliers au laboratoire ou in-situ. La grandeur « K » peut être utilisée pour la caractérisation de la perméabilité à l'eau ou au gaz du béton par des calculs appropriés.

2.3.1 Perméabilité à l'eau K_w

Jusqu'à présent il n'y a pas de procédure standardisée pour la mesure de la perméabilité à l'eau, chaque laboratoire a sa propre procédure utilisant un dispositif donné. Toutefois, toutes les procédures sont basées sur le même principe, qui consiste en l'application d'une pression

hydrostatique à l'échantillon de béton et à mesurer le débit de sortant en régime permanent (Figure 2.8). À partir du débit et des dimensions de l'échantillon, on peut déterminer le coefficient de perméabilité « K » selon la loi de DARCY et finalement en déduire le coefficient de perméabilité K_w selon l'équation 2.7.

$$K_w = K \cdot \gamma_e / \mu_e \quad (2.7)$$

Avec :

γ_e : Poids volumique de l'eau,

μ_e = viscosité de l'eau (10^{-3} N.s/m² à 20°C).

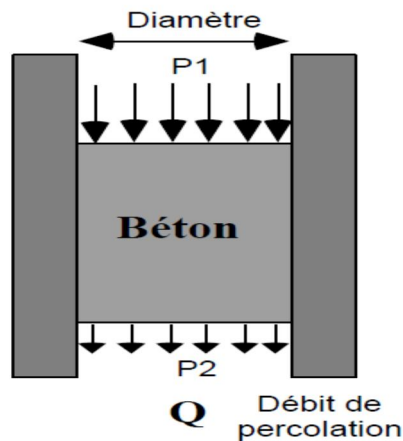


Fig. 2.8. Principe de mesure de la perméabilité à l'eau

N.B

Les essais de perméabilité à l'eau utilisant le principe de Darcy sont toutefois assez compliqués à réaliser et prennent beaucoup de temps. En pratique, il existe une procédure standardisée, selon la norme EN 12390-8 (2019) pour l'estimation de la perméabilité à l'eau du béton. Il s'agit de l'essai de pénétration d'eau sous pression, plus simple à réaliser et prend moins de temps et mais s'il ne donne pas un coefficient intrinsèque du matériau, il offre une bonne idée sur la perméabilité à l'eau du béton.

Comme le montre la figure 2.9, l'essai, consiste à appliquer de l'eau sous pression sur la face inférieure d'une l'éprouvette cubique (15 cm) ou cylindrique (Ø 20 cm), pendant un certain temps, la profondeur de pénétration de l'eau est mesurée en mm. La norme EN 12390-8 préconise une pression de 5 bars \pm 0,50 appliquée durant 72 \pm 2 heures sur l'échantillon du béton. Pour mesurer la profondeur de pénétration d'eau (mm), l'éprouvette est fendue en deux parties.

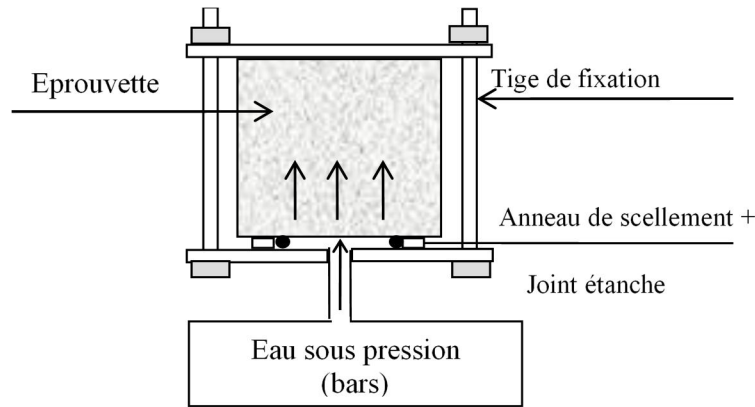


Fig. 2.9. Principe de mesure de la pénétration d'eau sous pression

2.4 Absorption d'eau par capillaire (Capillarité)

Le transfert d'eau dans les pores d'un matériau, suite à des tensions de surface (liquide/solide/gaz) à l'intérieur des capillaires, est appelé « Absorption d'eau par capillarité ». La capillarité (Absorption capillaire) dépend des caractéristiques de la structure poreuse (La taille et l'interconnexion des pores) ainsi que de l'état hydrique du matériau.

La tension capillaire P_i dans un pore cylindrique, est décrite par la loi de JURIN (Equation 2.8), en fonction de la tension superficielle du fluide γ , de l'angle de contact θ et du rayon r_i . Ainsi, la hauteur d'ascension du liquide h_i , exprimée en fonction de la pression P_i , de la masse volumique de l'eau ρ et de l'accélération g , est inversement proportionnelle au rayon de pore « r_i » (Equation 2.9).

$$P_i = \frac{2 \cdot \sigma_i \cdot \cos \theta}{r_i} \quad (2.8)$$

$$h_i = \frac{P_i}{g \rho} = \frac{2 \cdot \sigma_i \cdot \cos \theta}{r_i g \rho} \quad (2.9)$$

Par ailleurs, le débit du liquide absorbé par le capillaire est proportionnel à son rayon r_i . Cette relation est démontrée par la loi POISEUILLE en considérant un capillaire horizontal communiquant avec le liquide d'un côté et avec de l'air de l'autre. Quand un liquide de viscosité η entre dans le capillaire à une distance x , son débit Q_i , est donné par l'équation 2.10.

$$Q_i = \frac{\pi P_i r^4}{8 \eta x} \quad (2.10)$$

Avec P_i : Pression capillaire (Equation 2.8).

La capacité d'absorption d'eau capillaire du béton ou mortier est déterminée expérimentalement par un dispositif assez simple où l'absorption d'eau de l'échantillon est mesurée par pesage

successives après des intervalles de temps prédéfinis. La procédure est décrite par la norme EN 13057. Avant essai, les éprouvettes sont séchées dans une étuve ventilée à une température de 110°C, jusqu'à masse constante. La surface latérale des éprouvettes est enduite par une résine sur une hauteur d'environ 1 cm. Ceci permet une pénétration unidirectionnelle de l'eau (Figure 2.10). L'échantillon est placé sur des appuis posés au fond du bac rempli d'eau. Le niveau d'eau est maintenu constant à une hauteur de 2 ± 1 mm à partir de la base de l'éprouvette. La variation de la masse « ΔM_t » est mesurée après des laps de temps bien définie : 4, 9, 16, 25, 36, 49 minutes, ainsi que 1, 4, 8, 24 heures.

L'absorption d'eau par unité de surface Ca_t , à un temps t d'immersion donné est calculée par l'équation 2.11.

$$Ca_t = \frac{\Delta M_t}{A} \quad (2.11)$$

L'absorption d'eau capillaire « Ca_t » varie linéairement avec la racine carrée du temps (Equation 2.12). Le coefficient d'absorption « S » est calculé donc par la régression linéaire de l'ensemble des points du domaine linéaire. Le plus souvent ceci est observé entre 1 et 8 heures. Le coefficient d'absorption (sorptivity) est un paramètre important qui indique la tendance du matériau à capter l'eau par action capillaire, sans pression extérieure.

$$Ca_t = S\sqrt{t} \quad (2.12)$$

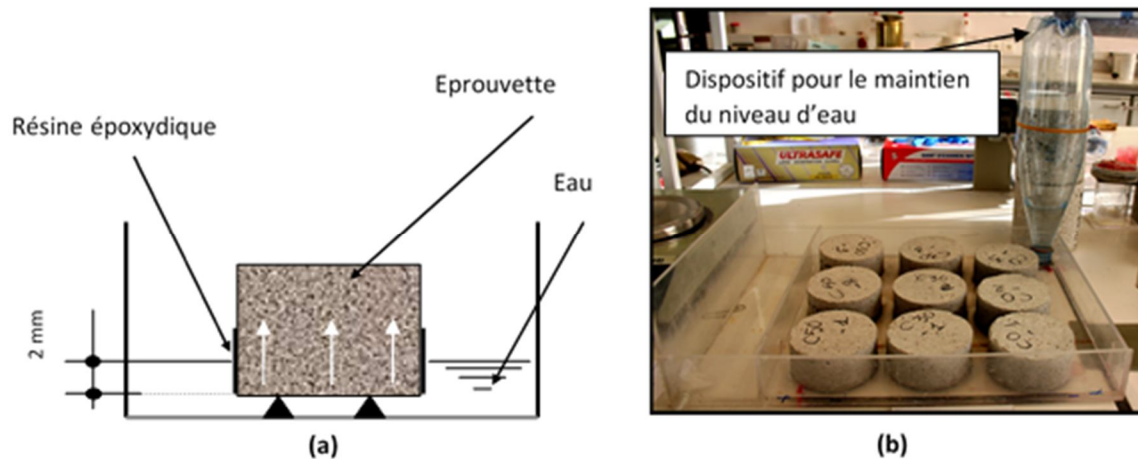


Fig. 2.10. Schéma et vue d'ensemble d'un banc d'essai de l'absorption d'eau par capillarité.

Chapitre 3 : Fissuration du béton : Types et origines

Dans son évolution, le béton est sujet à de multiples déformations, dues à des contraintes internes se développant suite à plusieurs phénomènes soit, reliés au comportement du matériau au cours de la prise et du durcissement (Retrait du béton), ou engendrées par des agressions chimiques de l'environnement extérieur (Sulfates, Chlorures, Acide, ...). Ces phénomènes sont souvent influencés par la nature des matériaux constitutifs du béton (Ciment, granulats et adjuvant) et par la composition de ce dernier (Rapport E/C, dosages du ciment, ...). Lorsque les contraintes internes sont excessives et dépassent la résistance à la traction du béton, les déformations conduisent à une fissuration du béton

D'un point de vue mécanique, une fissure est considérée comme une discontinuité dans le champ de déplacement à travers laquelle les contraintes de traction sont nulles ou diminuent en fonction de l'ouverture de fissure. La fissuration peut se produire par compression, traction ou cisaillement, aussi bien sous chargement statique qu'en fatigue, sous l'effet des charges mécaniques, chimiques ou physiques.

3.1 Typologie des fissures

Les fissures sont généralement classées selon leur importance et selon leur origine. Dans le béton, on rencontre souvent :

- Des fissures de surface caractérisées par une ouverture maximale en surface et qui s'annule au sein du matériau.
- Des Micro ou macro-fissures de surface et/ou à l'intérieur du matériau

Ces fissures peuvent influencer négativement la perméabilité du béton et donc son étanchéité, mais cependant peuvent être maîtrisées par une bonne conception du béton (choix des matériaux et des dosage) ainsi qu'une mise en œuvre appropriée.

D'autre part, il existe des fissures d'ouverture plus imposantes, causées généralement par des déformations structurelles telles que les fissures visibles sur deux faces de la structure appelée traversante. Ces dernières sont considérées comme fissures aveugles si elles sont bouchées sur la face non accessible de la structure (cas des murs de soutènement). Ce genre de fissures annule généralement l'état de service de la structure, notamment s'il s'agit d'un ouvrage hydraulique et nécessite, après expertise, une réparation spécifique.

3.2 Origine des fissures du béton

Il existe plusieurs causes de fissuration du béton, soit à son état frais (avant durcissement) ou à son état durci (Figure 3.1), suite à des actions physiques, chimiques, thermiques ou structurelles. Les causes des fissures peuvent par ailleurs être classées en trois catégories :

1. Problème de mise en œuvre : Ségrégation, problème de coffrage,
2. Causes structurelles : Chargement excessif, action accidentelle, défauts de construction,
3. Causes dues au comportement du matériau et de l'environnement extérieur.

Dans ce cours, les deux premières catégories ne seront pas traitées. Cependant on s'intéressera principalement aux actions dues aux comportements du béton (le matériau) suite à son évolution structurelle progressive liée à l'hydratation du ciment dans le temps, jumelée à l'influence de l'environnement extérieur (température, hygrométrie, agressions chimiques, ...).

3.2.1 Déformation du retrait du béton

Après mise en œuvre du béton, dès que le ciment entre en contact avec l'eau, des hydrates précipitent et s'organisent en formant une structure qui évolue progressivement dans le temps. Pendant cette phase où l'action de l'eau est fondamentale et son rôle est variable, coexistent plusieurs phénomènes conduisant tous vers une variation dimensionnelle du béton, principalement une réduction de son volume. Ces déformations, si elles ne sont maîtrisées, conduisent à une fissuration du béton, peuvent résulter de plusieurs processus :

- Retrait plastique,
- Retrait endogène,
- Retrait hydraulique ou retrait de séchage,
- Retrait thermique.

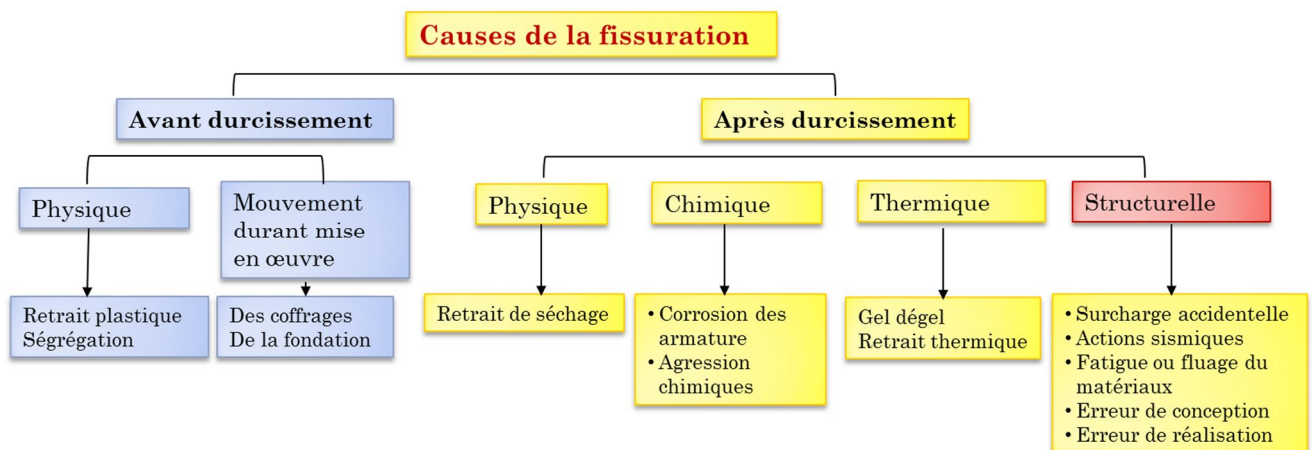


Fig. 3.1. Origines de la fissuration du béton

3.2.1.1 Retrait plastique

Le retrait en phase plastique du béton résulte d'un séchage (de l'eau) rapide du mélange non encore durci, principalement en surface, sous l'effet du vent ou de l'ensoleillement. Cette dessiccation (séchage) provoque une diminution de volume considérable (0,4 à 4 mm/m). Cette déformation est jusqu'à 10 fois supérieure au retrait du béton durci.

Ce changement de volume est compensé au début pour une grande partie par la déformabilité du béton frais. Durant la prise, le béton durcit progressivement. Tant que la surface reste humide, aucune contrainte capillaire ni aucune fissuration ne survient. En effet, lorsque la surface est entièrement séchée, les fissures de retrait plastique apparaissent. Elles sont causées par les contraintes de traction résultant du retrait, engendré par l'évaporation de l'eau du béton frais encore trop peu résistant pour pouvoir s'y opposer.

Le retrait plastique est habituellement attribué à une cure (Protection du béton durant les premiers jours de sa mise en œuvre contre l'évaporation) insuffisante ou mal adaptée. Les fissures engendrées par le retrait plastique sont peu profondes (Figure 3.2).



Fig. 3.2. Fissuration superficielle due au retrait plastique

3.2.1.2 Retrait endogène

Après la prise du ciment, l'hydratation se poursuit dans le temps et ce reflète par l'évolution des résistances mécaniques du béton. Durant ce temps, l'hydratation entraîne dès le début de la prise, une auto-dessiccation au sein du matériau, tout simplement parce que le volume de matière solide après hydratation (hydrates) est inférieur au volume initial du ciment et de l'eau consommée dans la réaction. Cette différence (diminution) du volume entraîne une déformation que l'on appelle retrait endogène.

- Auto-dessiccation :

L'auto-dessiccation signifie une augmentation du volume gazeux dans des pores initialement saturés en eau. Dans le cas du retrait endogène, la diminution de la teneur en eau est liée à la consommation interne de l'eau par l'hydratation du ciment.

Hydratation ↑, Humidité ↓ → Dépression capillaire ↑ → Retrait d'auto-dessiccation.

L'évolution du retrait endogène suit celle de la résistance : rapide dans les premiers jours, atteint 80 à 90 % à 28 jours. La déformation du retrait endogène reste cependant faible mais peut être non négligeable lorsqu'il est cumulé avec d'autres types de retrait. De plus, si ce retrait est empêché (ou gêné) dès le début de la prise (Résistance de la pâte de ciment, support rigide, reprise de bétonnage, ...), il peut conduire à une fissuration précoce non négligeable.

3.2.1.3 Retrait hydraulique (de séchage)

L'hydratation du ciment consomme une partie relativement faible d'eau (environ 2,0 litres pour 1 kg de ciment), qui représente moins de la moitié de l'eau de gâchage incorporée dans un béton courant. Le surplus d'eau est généralement utilisé pour le mouillage des granulats et pour une ouvrabilité convenable du béton.

Le retrait hydraulique est défini par la diminution de volume du béton observée au fur et à mesure de son séchage (Départ d'eau des capillaires vers le milieu extérieur) dans le temps. Plus la quantité d'eau non liée s'évapore rapidement, plus le retrait est important. Ce processus est d'autant plus important que l'excès d'eau non liée est important (Grand rapport E/C). En effet un rapport E/C élevé conduit à une porosité et une perméabilité du béton importantes, ce qui accentue d'avantage le phénomène.

3.2.1.4 Retrait thermique

Les réactions d'hydratation du ciment sont exothermiques (s'accompagnent d'un dégagement de chaleur). Cela peut donner lieu à une augmentation considérable de la température du béton. Cet échauffement est suivi par une période de refroidissement, conduisant à une contraction (déformation) ou de retrait thermique. C'est alors que des fissures peuvent surgir sous deux mécanismes :

- Par blocage des mouvements d'ensemble lorsqu'un obstacle empêche la déformation (retrait) de l'élément de béton.
- Par gradient thermique, qui a lieu lorsque la température du béton proche du milieu extérieur (la peau du béton) diminue plus rapidement que celle du béton du cœur. Ceci génère un retrait nettement plus élevé en surface de l'élément qu'au cœur.

Le retrait thermique " ε " peut se calculer en fonction de du coefficient de dilatation thermique du béton « α » et de la différence de température du matériau « ΔT », par la formule de l'équation 3.1. A l'état durci, le coefficient de dilatation du béton varie de 7 à $14 \cdot 10^{-6}$ m/m/°C. Il est fortement fonction du dosage des granulats et de leur nature.

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Dans le cas d'un retrait empêché (blocage du mouvement), des fissures traversantes peuvent se former lorsque le refroidissement se poursuit jusqu'à une température à laquelle les tensions sont supérieures à la résistance à la traction du béton. La déformation limite en traction est d'environ $150 \cdot 10^{-6}$ m/m. Si le coefficient de dilatation thermique est de $10 \cdot 10^{-6}$, alors la chute de température T pouvant amener la fissuration (figure 3.3), est de $T = (150 \cdot 10^{-6}) / 10 \cdot 10^{-6} = 15$ °C.

Dans le cas de gradient thermique, il est admis que des écarts de température de 15 à 20 °C entre la peau et le cœur du béton sont suffisants pour engendrer un état de fissuration. Ceci se produit lorsque la peau du béton se refroidit plus rapidement que le cœur. Le diagramme des contraintes prend alors la forme parabolique comme représenté à la figure 3.4. La peau du béton est soumise dans ce cas à des contraintes de traction importantes alors que le béton du cœur est en compression. Ce processus est rencontré le plus souvent dans les pièces en béton de masse (plus de 50 cm d'épaisseur) et ne donne pas lieu à des fissures traversantes. La fissuration engendrée dans ce cas apparaît en surface.



Fig. 3.3. Fissures de retrait thermique empêché dans un voile en béton d'un réservoir.

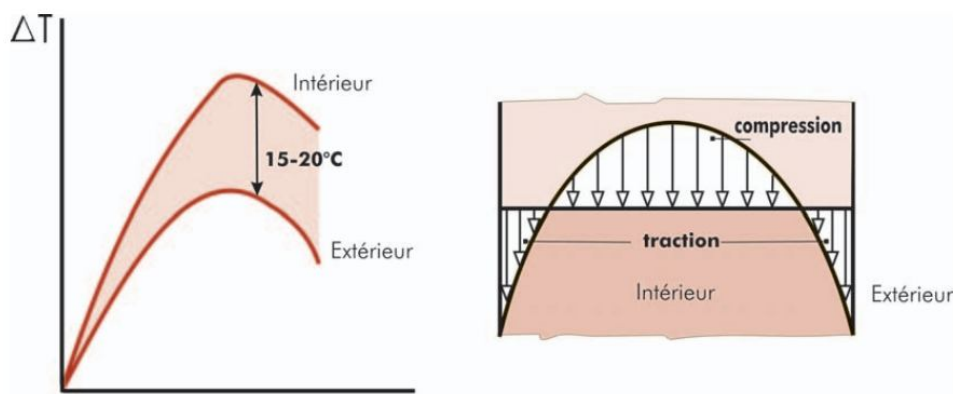


Fig. 3.4. Diagramme de contrainte suite un gradient de température de 15 à 20°C entre la peau et le cœur du béton.

3.2.1.5 Maitrise de la fissuration en fonction du type de retrait

Le tableau 3.1 montre les différents types de fissuration engendrée par le retrait du béton, ainsi les délais d'apparition. Les paramètres influençant le retrait sont regroupés en trois catégories à savoir :

1. *La composition de béton* : Choix des matériaux et dosage.
2. *La cure du béton* : il s'agit de la méthode appliquée (moyen et durée) pour la protection du béton après son coulage à fin d'éviter une évaporation excessive de l'eau.
3. *Disposition d'armature supplémentaire* : Les armatures servent à contrer les déformations du retrait ou de disperser la fissuration.

Tableau 3.1 : Risques de fissuration en fonction du type de retrait.

Type de retrait	Risques de fissuration		Utilité / efficacité de diverses mesures		
	Délai d'apparition	Types de fissures	Composition du béton	Cure	Armature
Retrait plastique	avant ou pendant la prise	superficielles	faible	très élevée	nulle
Retrait de dessiccation (consommation de l'eau du béton durant le durcissement (retrait endogène) ou séchage du béton durci (retrait hydraulique))					
• à court terme	quelques jours à quelques semaines après bétonnage	superficielles à traversantes	très élevée	très élevée	moyenne
• à long terme	quelques mois à quelques années après bétonnage	traversantes	très élevée	élevée	très élevée
Retrait thermique	20 h à 10 jours après bétonnage	superficielles à traversantes	élevée	très élevée	moyenne

3.2.2 Agression physico-chimiques

Les ouvrages hydrotechniques sont exposés en permanence à l'humidité ou à de l'eau (usée, de mer, traitée) qui est très souvent chargée d'agents chimiquement agressif (Chlorure, Sulfates, sels ...). La présence de ces substances, agissantes d'une manière directe (réaction avec les composés du béton) ou indirecte (conduisant à une corrosion des armatures), peuvent conduire à une fissuration voire une détérioration du béton, qui compromettra ses fonctions de services. Nous exposerons ci-après les mécanismes d'attaques physico chimique les plus répandues pour les ouvrages hydrauliques.

3.2.2.1 Attaque des sulfates

Les sulfates sont des substances chimiques pouvant se trouver dans différents milieux tel que : l'eau de mer ; les eaux souterraines ; les eaux usées.

L'attaque des sulfates peut conduire à une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs. Cette action peut être jumelée à une perte des propriétés liantes des hydrates « CSH » du ciment. L'expansion (ou gonflement) peut conduire à des dégâts structuraux importants dans une durée de temps relativement courte (10 à 15 ans). Suite à une expansion importante, lorsque le béton se fissure, la perméabilité du béton augmente et l'eau agressive peut pénétrer plus aisément, accélérant ainsi le rythme de détérioration. La perte des propriétés liantes engendre une perte de résistance et un écaillage du béton en surface.

- *Sulfates de sodium,*

L'attaque conduit à une expansion résultant de la formation d'ettringite secondaire ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) selon les réactions suivantes :

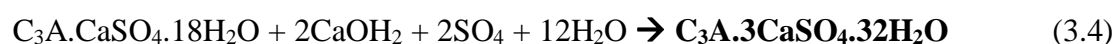
- Formation de gypse secondaire (échange ionique entre les sulfates et la portlandite).



- Formation d'ettringite secondaire à partir des aluminates C_3A résiduels du ciment :



La formation d'ettringite peut se faire à des aluminates hydratés :



La précipitation rapide de l'ettringite (Figure 3.5) conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est supérieur de 3 à 8 fois au volume du solide initial ce qui conduit à une fissuration importante du béton (Figure 3.6).

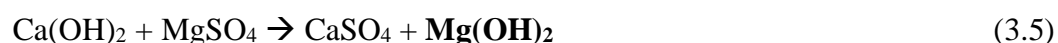


Fig. 3.5. Ettringite

Fig. 3.6. Fissuration induite par une attaque de sulfates de sodium

- *Sulfates de magnésium MgSO_4 ,*

L'action des sulfates de magnésium est très agressive car il présente une double action par formation d'ettringite (équations 3.5 et 3.6) ainsi que la substitution ionique des Ca^{2+} par les Mg^{2+} . Ces échanges ioniques ($\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$) conduisent à une transformation des silicates de calcium hydratés « CSH » en des silicates de magnésium hydraté « MSH » (Equation 3.7). Les MSH n'ont pas de propriétés liantes contrairement aux CSH. D'autre part, la cristallisation de l'ettringite en présence de sulfate de magnésium accélère la formation du gypse secondaire. La figure 3.7 montre un exemple des dégâts causés par une attaque des sulfates de magnésium.



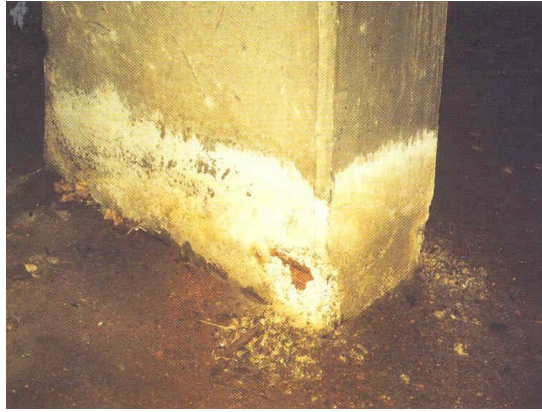


Fig. 3.7. Dégâts causés par une attaque des sulfates de magnésium

3.2.2.2 Corrosion des armature

La majorité des structures hydraulique sont construit en béton armé. Ce matériaux composite (béton et acier) permet de supporter les charges structurales et assurer l'étanchéité de l'ouvrage.

Les barres d'acier (armature) du béton armé est enrobé du béton qui a une forte basicité (pH de l'ordre de 13,5), sont aussi recouvertes d'un film très fin d'oxydes protecteur. La basicité du béton protège cette fine couche et permet à l'acier de ne pas se corroder. Si le béton d'enrobage est chimiquement modifié (diminution du pH à des valeurs < 9), le filme protecteur se déchire et l'acier tend à se corroder en présence d'eau et d'oxygène.

La réaction de corrosion est évolutive dans le temps, cause un gonflement et une fissuration pouvant engendrer des dégâts structuraux très importante (Figure 3.8).



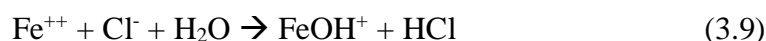
Fig. 3.8. Conduite en béton armé détériorée par la corrosion

Le béton armé est au contact avec le milieu naturel : l'atmosphère, le sol et/ou l'eau. Ces milieux peuvent contenir des substances agressives. Les substances à l'origine de la corrosion des armatures sont principalement le dioxyde de carbone (CO₂) et les chlorures (Cl⁻) :

- Le dioxyde de carbone CO₂ pénètre dans le béton est provoque une réaction, dite de carbonatation (Equation 3.8) qui avance progressivement à partir du parement. Cette réaction fait abaisser le pH du béton jusqu'à 9, ce dégrade la passivation des aciers.



- Les chlorures dissous dans l'eau de mer, sels de déverglaçage, ou autre, lorsqu'elles pénètrent dans le béton, et si le taux de concentration au prôt des armatures est important la réaction (équation 3.9) se produit et tend à diminuer le pH du béton à des valeurs de 3.



3.2.2.3 Réaction Alkali silice

Il s'agit d'une pathologie très crainte dans les ouvrages massifs tel que les barrages, à cause de l'état de fissuration qu'elle peut engendrer si les dispositions de conception nécessaire du béton ne sont pas prises. La photo de la figure 3.9 montre l'importance de la fissuration due à une réaction alcali silice.

La Réaction Alkali silice est une Réaction endogène « Interne ». Elle affecte les ouvrages dont le béton a été confectionné par des granulats potentiellement réactifs (contenant de la silice réactive). Pour que la réaction se manifeste, il faut en plus une source d'alcalins K_2O , Na_2O (Ciments, additions, granulats, adjuvants), de l'humidité relative supérieur à 80-85% et une forte concentration d'ions hydroxyles (pH élevé).

Le mécanisme de la réaction alcali-silice passe par une dissolution de la silice sous l'action de la solution interstitielle, suivie de la précipitation d'un gel expansif de silico-calco-alcalin. Cela engendre des fissures à travers les agrégats et une perte d'adhérence peut également se produire entre les granulats et la matrice.



Fig. 3.9. Béton fissuré suite à une Alkali Silice Réaction.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a pu voir que le béton est un matériau sujet à fissuration suite à de multiples raisons potentielles, que soit des déformations du retrait au courant de son évolution (différents types) ou des agressions chimiques durant sa vie de service. Cette fissuration, si elle a lieu peut compromettre sérieusement la qualité du béton, notamment sa résistance et son étanchéité et dont sa capacité de service. Il est à noter toutefois, que toutes les causes et l'intensité de la fissuration du béton sont liées directement à sa microstructure et sa résistance chimique. Ces propriétés sont reliées à leur tour aux caractéristiques et des dosages des matériaux utilisés (liant et granulats).

Chapitre 4 : Composition du béton des ouvrages hydrauliques

Rappelons que le béton est matériau composé par des ingrédients de base qui sont les granulats (sable et gravier), le ciment et l'eau. On peut confectionner un béton ordinaire que par ces matériaux. Cependant, dans un souci d'améliorer les propriétés du béton pour qu'il soit adapté à des contraintes particulières (structurelles et environnementales), la composition du béton est souvent modifiée en ajustant les proportions des différents ingrédients et/ou en ajoutant au béton d'autres matériaux tel que adjuvants et additions minérales. Cette technologie permettrait une modification de la consistance du béton à l'état frais et sa microstructure après durcissement. Ces modifications conduiront à des améliorations dans les propriétés mécaniques et d'étanchéité du béton, lui conférant ainsi une meilleure durabilité.

Dans cette partie nous allons en premier lieu, parler des spécifications des ouvrages hydrauliques et, en suite présenter l'influence des paramètres essentiels de la composition du béton sur ses propriétés et ainsi donner des recommandations pour aboutir à une composition de béton résistant et durable, convenant aux exigences des ouvrages hydrauliques.

4.1 Spécifications du béton des ouvrages hydrauliques

Pour la construction des ouvrages hydrauliques en béton armé (Stations d'épuration, réservoirs, bassin, ouvrages annexes, ...), le béton doit posséder des caractéristiques particulières aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci :

- Consistance (ouvrabilité) élevée,
- Bonne résistance mécanique, Etanchéité à l'eau ;
- Hautement résistant aux agressions chimiques ;

Les exigences de la composition du béton pour atteindre ces propriétés, sont conditionné par les normes internationale en vigueur en fonction des l'environnement d'exposition du béton. La norme EN 206-1 définit plusieurs classes d'exposition regroupées par risque de corrosion ou d'attaques physiques ou chimiques. A ces classes sont associées des exigences minimales que le béton doit respecter (Classe de résistance du béton minimale, du dosage en ciment, du rapport E/C et même la valeur d'absorption d'eau (porosité) du béton.

4.1.1 Classes d'exposition

Les ouvrages hydrotechniques sont exposés en permanence à l'humidité ou à de l'eau (usée, de mer, traitée, ...) qui est très souvent chargée d'agents chimiquement agressif (Chlorure, Sulfates, sel ...). Les classes d'exposition, selon la norme EN 206-1, qui concernent ces ouvrages sont comme suit :

- *Classe XC : Corrosion causée par carbonatation*

Ces différentes classes concernent le béton qui contient des armatures et qui est exposé à de l'air et à de l'humidité ambiante simultanément. Si le béton est isolé de l'environnement

humide, les classes ne s'appliquent pas : Selon les conditions d'humidité, quatre classes sont définies XC1, XC2, XC3, XC4.

- *Classe XS : Corrosion induite par des chlorures dans un environnement marin*

Cette classe s'applique au béton armé lorsqu'il est soumis aux chlorures de l'eau de mer ou à l'action de l'air marin. Les différentes sous-classes d'exposition sont comme suit :

- XS1 : Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer,
- XS2 : Immergé en permanence,
- XS3 : Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns.

- *Classe XD : Corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre que marine.*

Cette classe s'applique pour le béton armé soumis au contact d'une eau contenant des chlorures, autre que l'eau de mer. Les différentes sous-classes sont :

- XD1 : Humidité modérée.
- XD2 : Humide, rarement sec.
- XD3 : Alternance de cycles d'humidité et de séchage.

- *Classe XA : Attaque chimique.*

Cette classe s'applique lorsque le béton est exposé aux attaques chimiques, se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface ou les eaux souterraines :

- XA1 : Faible agressivité chimique.
- XA2 : Agressivité chimique modérée.
- XA3 : Forte agressivité chimique

4.1.2 Exemple d'un béton d'une station d'épuration d'eau

- *Spécificités*

Le béton de tels ouvrages (stations d'épuration) est en contact avec des eaux usées, ce qui implique un risque élevé de corrosion par carbonatation (de l'extérieur) et par chlorure (de l'intérieur). Si la région où est implanté l'ouvrage est une zone froide, s'ajoute à cela le risque de gel dégel du béton. Dans un tel cas, le béton se doit d'être résistant, étanche (Imperméabilité à l'eau) et doit impérativement résister à l'agressivité chimique pour éviter la fissuration induite par une éventuelle corrosion d'armature. D'un point de vue normatif, le béton est exposé aux classes XC1, XF2, XD3 et XA3. C'est l'un des cas les plus défavorables où le béton doit bénéficier d'une attention particulière d'un point de vue conception et mise en œuvre.

- *Recommandations normatives*

La norme EN 206-1 préconise pour le béton :

- Une classe de résistance du béton « 35/40 »
- Une consistance (ouvrabilité) de classe « S3 » pour la construction de voiles est S3, soit une valeur d'affaissement au cône d'Abrams comprise entre 100 et 150 mm. Cette consistance facilitera le coulage du béton dans les zones fortement ferraiillées,
- Un rapport Eau/Ciment est de maximum 0,45,

- Une teneur en ciment est de minimale de 365 kg/m^3 ,
- Le béton doit avoir une faible absorption d'eau ; la norme préconise une valeur maximale de 4% (voir méthode de mesure de l'absorption d'eau dans le chapitre 2).

4.2 Influence des paramètres de la composition du béton

4.2.1 Le ciment : Type et dosage

- *Type de ciment*

Comme il a été présenté au chapitre 1, il existe principalement cinq (05) types de ciment Portland (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV et CEM V) différents de par le type d'ajout utilisé et de par son taux d'utilisation.

Le choix du ciment dépend de son domaine d'utilisation. En effet, selon la norme EN 206-1, Le ciment doit être choisi parmi ceux dont l'aptitude à l'emploi est établie et en prenant en considération :

- Domaine d'utilisation du béton,
- Les conditions de cure et de mise en œuvre (Climat chaud),
- Les dimensions de la structure (développement de chaleur),
- Les agressions environnementales,
- La réactivité potentielle des granulats aux alcalins (Alcali Silice réaction).

Tous ces critères, reliés à la capacité du ciment à s'adapter aux conditions de l'environnement sont conditionnés par les mécanismes d'hydratation du ciment et sa résistance chimique. Les ciments de type CEM I et CEM II ne contiennent pas, voire, peu d'ajouts (< 35%), qui sont la plupart des cas inertes tel que le calcaire. Les ciments de type CEM III et CEM IV et CEM V contiennent des quantité importante d'ajout pouzzolanique (laitier, fumée de silice, centre volante, pouzzolane).

Les ajouts pouzzolanique confèrent au ciment une bonne résistance aux agents agressifs tel que les sulfates ou les acides. La figure 4.1 montre la faible expansion des mortiers à base de ciment au laitier (CEM III) par rapport au mortier témoin fait avec un ciment de type CEM I, dans un milieu sulfatiques.

Par ailleurs, les ciments contenant des taux importants d'ajouts pouzzolaniques (CEM III, CEM IV et CEM V) développent moins de chaleur d'hydratation. Comment le montre la figure 4.2, les ciments de type CEM III et V sont ceux qui ont le flux de chaleur le moins important. Ceci à une influence directe sur le retrait du béton et de l'état de fissuration résultants.

D'un point de vu microstructural, les matrices cimentaires contenant des ajouts pouzzolanique, développent une porosité plus raffinée (figure 4.3) avec une distribution des pores orientée vers les petits diamètres, même si la porosité totale reste plus importante par rapport aux ciments CEM I et II. Une telle microstructure réduit significativement les propriétés d'étanchéité (perméabilité et capillarité) du béton résultant. Toutefois, il a été noté que cet effet de densification apparait qu'à long terme (plus de 28 jours) et reste conditionnée par une cure (protection) de béton appropriée (durée et méthode) afin de permettre aux ajouts pouzzolanique une hydratation latente suffisante.

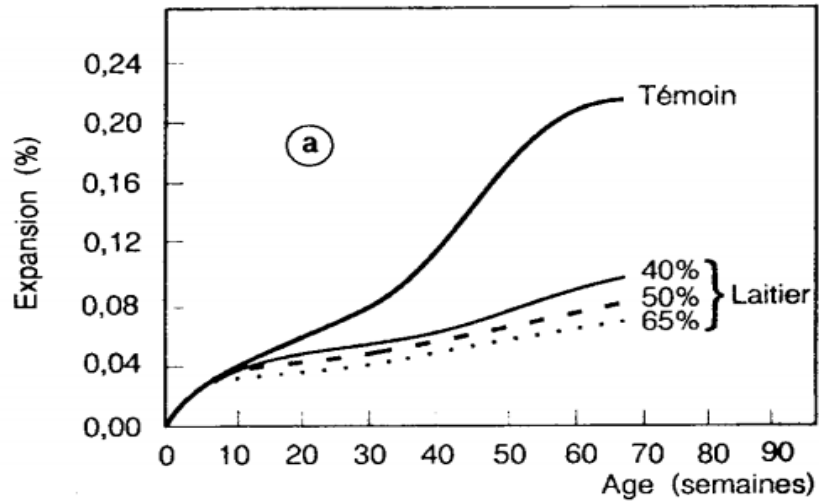


Fig. 4.1. Résistance aux sulfates de mortier de ciment avec ajouts de laitier

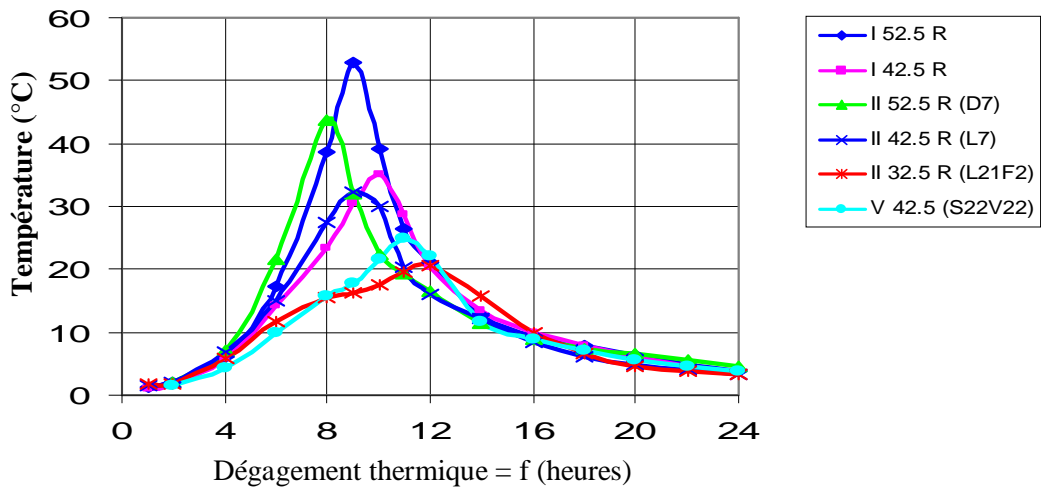


Fig. 4.2. Dégagement de chaleur d'hydratation de différents types de ciment

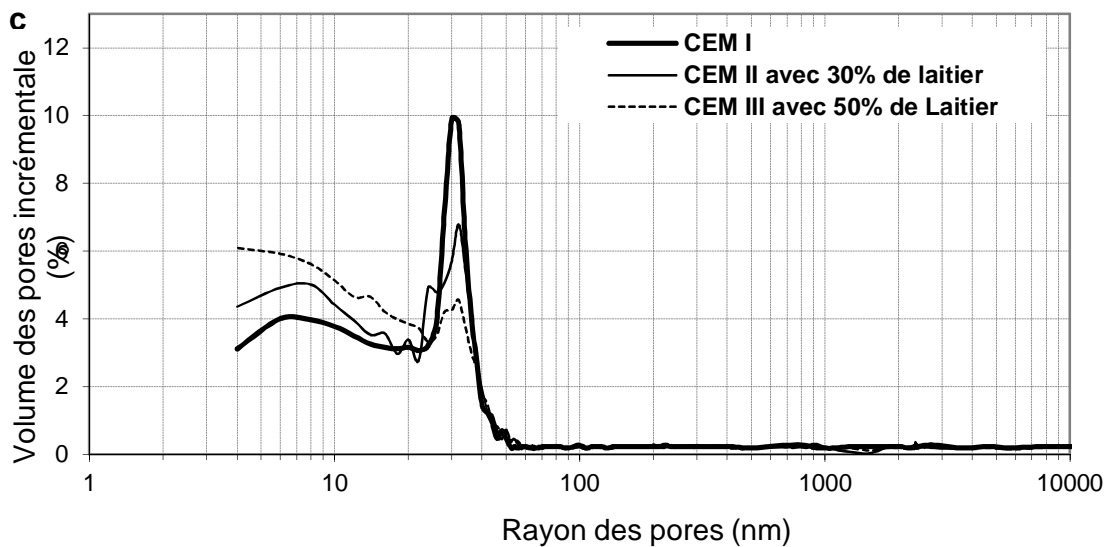


Fig. 4.3. Influence du type de ciment sur la courbe de distribution des pores

- *Dosage du ciment*

Une augmentation du dosage du ciment dans le béton conduit à une augmentation de la résistance mécanique et une diminution de la porosité capillaire. Cependant, un surdosage excessif peut conduire à dégagement élevé de la chaleur d'hydratation et un retrait important (thermique ou endogène). Le dosage en ciment des bétons usuels de classe de résistance 25/30 est d'environ 300 à 350 Kg/m³. Lorsque le béton est confronté à un milieu hostile (cas extrême d'ouvrages hydrauliques), des exigences de durabilité sont données quant au dosage minimal de ciment (Liant équivalent dans le cas où des additions sont utilisées), en fonction de l'agressivité du milieu (cas environnementale) comme le montre les tableaux 4.1 et 4.2. Pour un diamètre maximal des granulats de 25 cm, le dosage en ciment minimal « D_c » est passé de 330 à 385 Kg/m³ lorsque l'environnement est devenu très agressif. Cette augmentation de dosage permettrait une densification de la microstructure et donc une amélioration des propriétés de transfert du béton (perméabilité, capillarité, diffusion, ...), ce qui améliorera sa résistance vis-à-vis des agressions chimiques.

Tableau 4.1 : Dosage minimal en ciment en fonction du milieu d'exposition de l'ouvrage

Milieu d'agressivité	Dosage minimal en ciment D_c	D_c pour $D_{max} = 25$ cm
Sans agressivité	$D_c = \frac{500}{\sqrt[5]{D_{max}}}$	290 Kg/m ³
Milieu très agressif	$D_c = \frac{700}{\sqrt[5]{D_{max}}}$	370 Kg/m ³

Tableau 4.2 : Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition agressives (EN 206-1)

Classes d'exposition	MARINS		CHLORES		CHIMIQUES		
	XS2/XS1	XS3	XD2	XD3	XA1	XA2	XA3
E_{EFF}/Liant équivalent maximale	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur minimale en liant équivalent (kg/m³)	330	350	330	350	330	350	385

4.2.2 Le rapport E/C

Le rapport Eau/Ciment (E/C) ou Eau/Liant (E/L) lorsqu'une addition minérale est ajoutée (Liant = Ciment + Addition), est un paramètre très important de la composition de béton, d'un point de vue influence sur les caractéristiques mécaniques et de durabilité du béton. En effet, ce paramètre, comportant les deux éléments essentiels (l'eau et le ciment) du développement de la matrice cimentaire du béton, gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui conditionne le réseau de pores capillaires résultant de l'hydratation du ciment. Le réseau de pores capillaires influence à son tour les propriétés physiques du béton ou de son étanchéité (porosité et perméabilité).

Théoriquement, d'un point de vue strictement chimique, la quantité d'eau nécessaire à une hydratation complète du ciment représente 25% de son poids, soit un rapport E/C de 0,25. Il est toutefois admis qu'avec un rapport E/C de 0,42, tous les grains de ciment peuvent s'hydrater. Cette hydratation, même complète, entraîne la création de vides non remplis d'eau. Cela est expliqué par le phénomène dit « contraction de Le Châtelier » qui démontre que le volume des produits d'hydratation (hydrates) est inférieur au volume de l'eau et du ciment correspondant (Volume des hydrates = Volume du ciment + 0,736 x volume de l'eau). Toutefois, avec juste assez pour hydrater le ciment (pas d'eau excédentaire), la porosité capillaire serait minime.

Dans la pratique, pour des raisons d'ouvrabilité du béton et de mouillage des granulats, les quantités d'eau utilisées usuellement sont beaucoup plus importantes (de 0,5 à 0,7). Partant de là, la question qui se pose : **où va l'eau excédentaire qui n'est pas consommée par l'hydratation du ciment ?**

Si le rapport E/C est supérieur à environ 0,40, la quantité d'eau est supérieure à celle nécessaire pour une hydratation complète des grains de ciment. Ces grains sont éloignés et leur hydratation ne permet pas de remplir tout l'espace capillaire (figure 4.4). Lorsque l'hydratation arrive à terme, il restera une quantité importante d'eau libre dans le matériau. L'évaporation de cette eau engendrera forcément la formation d'une porosité capillaire importante. Ce qui nous amène à dire qu'une augmentation du rapport E/C, au-delà des valeurs usuelles, conduit à une diminution de la résistance mécanique du béton et à une augmentation certaine de sa perméabilité comme le montre la figure 4.5. De même, l'utilisation d'un rapport E/C élevé favorise l'absorption capillaire du matériau et ainsi la pénétration d'agents potentiellement agressifs vers le cœur du béton.

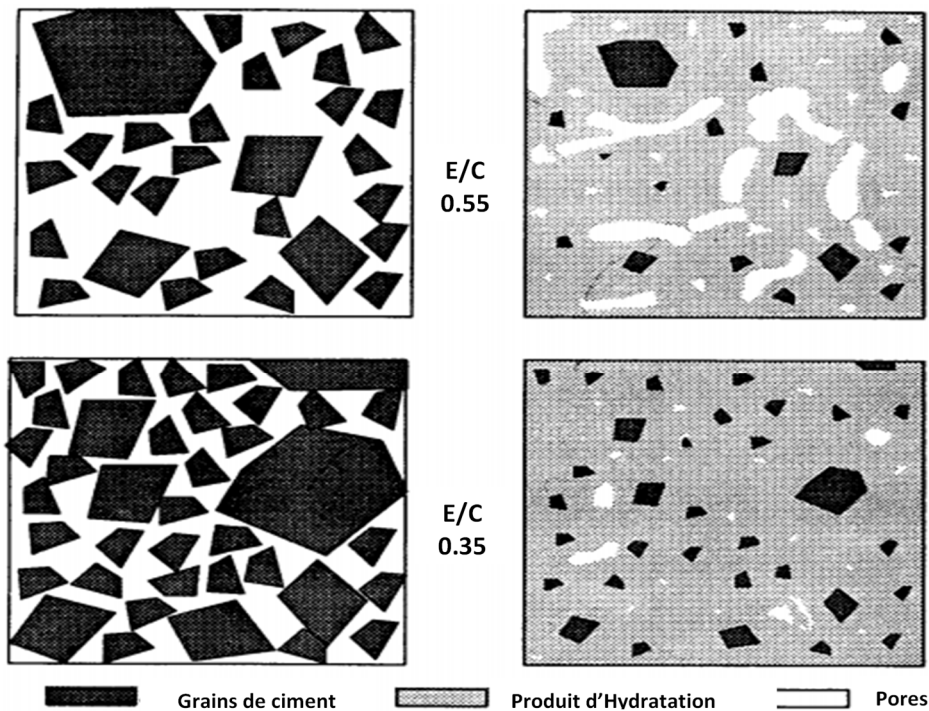


Fig. 4.4. Représentation schématique de la pâte de ciment avant et après durcissement en fonction du rapport E/C.

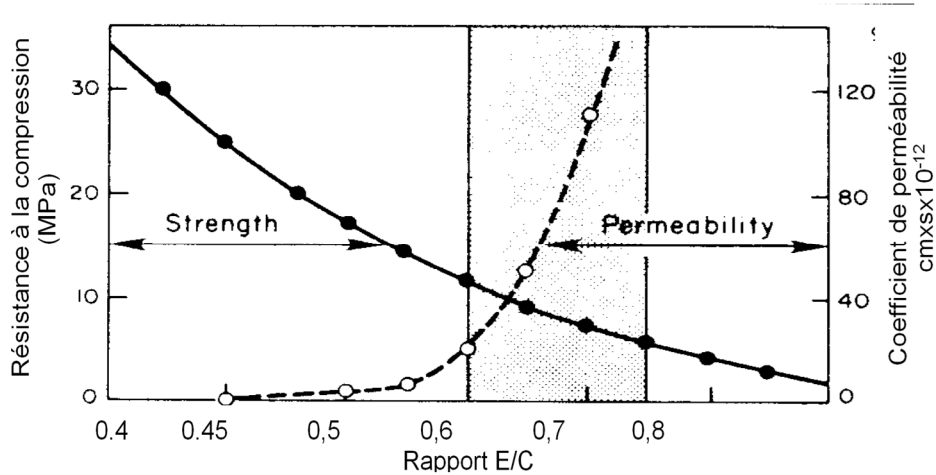


Fig. 4.5. Influence du rapport E/C sur la résistance et la perméabilité du béton

Afin de contrôler la perméabilité du béton et donc sa résistance à des éventuelles agressions chimiques du milieu extérieur, le rapport E/C doit être diminué le plus possible. La figure 4.6 montre l'effet bénéfique de la diminution du rapport E/C sur la perméabilité du béton, on peut même voir qu'un béton d'un rapport E/C de 0.40 développe à un jour d'âge la même perméabilité qu'un béton d'un rapport E/C de 0.70 à 28 jours d'âge. Comme le montre le tableau 4.2, la normalisation exige des rapport E/C maximaux en fonction de l'intensité de l'agressivité du milieu. C'est une manière indirecte pour ralentir la pénétration des substances chimiques en augmentant l'étanchéité du béton.

Il est à noter que l'utilisation de faibles rapport E/C, ne doit pas affecter les propriétés du béton à l'état frais (ouvrabilité). Il est évident que plus on diminue le rapport E/C plus l'ouvrabilité du béton est touchée. Généralement l'utilisation de d'adjuvant plastifiant ou super-plastifiant (dont le principe sera exposé ultérieurement) représente une solution optimale pour maintenir l'ouvrabilité du béton toute en diminuant son rapport E/C.

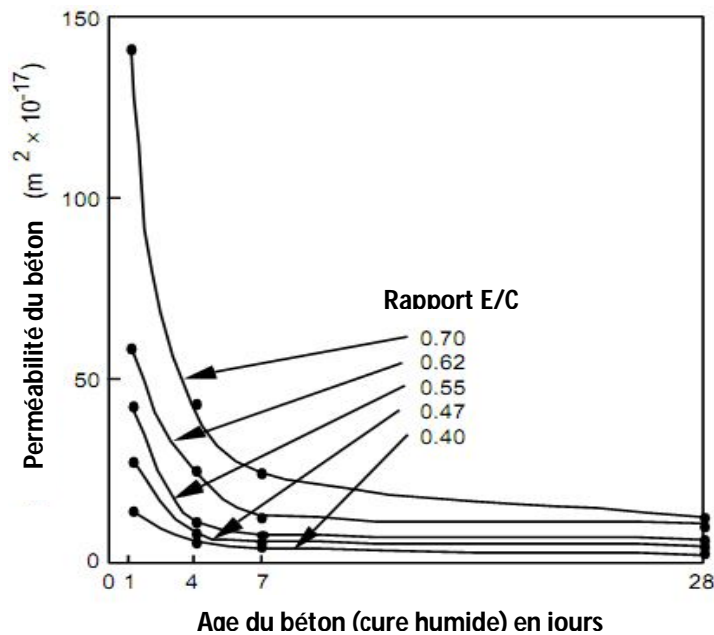


Fig. 4.6. Influence du rapport E/C sur la perméabilité du béton

4.2.3 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications de ses propriétés à l'état frais et/ou à l'état durci. Les adjuvants existent en poudre ou en liquide et sont accompagné par des fiches techniques expliquant le domaine d'utilisation ainsi que les dosages usuels. Il est à noter, toutefois que le dosage optimal est toujours déterminé par des essais de convenance au laboratoire. Les adjuvants sont classés par les normes internationales, selon leur action principale, comme suit :

- **Plastifiants et Superplastifiants,**
- Rétenteurs d'eau,
- Entraîneurs d'air,
- Accélérateurs de prise et/ou de durcissement,
- Retardateurs de prise,
- **Hydrofuges de masse.**

Il existe également d'autres adjuvants tels que notamment : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortier stabilisé, les colorants, les inhibiteurs de corrosion, les générateurs de gaz, etc.

Dans ce cours, l'objectif n'étant pas de traiter tous les types d'adjuvant et de leur fonctionnement, on s'intéressera exclusivement aux adjuvants qui sont utilisés pour les bétons des ouvrages hydrauliques, leurs apportant des solutions optimales aux états frais et durci. Il s'agit des plastifiant et superplastifiants, des hydrofuges de masse.

- *Plastifiant et superplastifiant*

Lorsque les grains de ciment sont en contact avec le l'eau lors du malaxage du béton, ils ont tendance à former des floques, qui retiennent une quantité d'eau la rendant inutile. Les plastifiants (ou superplastifiants) ce sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment et provoquent une défloculation des grains et une lubrification de la pâte (figure 4.7). L'eau piégée est libérée et les grains de ciment auront une meilleure surface de contact avec l'eau et donc une meilleure hydratation. Ce processus, comme le montre la figure 4.8 permet soit :

- Une amélioration de l'ouvrabilité sans augmenter le dosage en eau,
- Une réduction du rapport E/C sans modifier la maniabilité.

On peut également jouer partiellement sur les deux paramètres pour augmenter les résistances mécaniques et d'étanchéité (en diminuant le rapport E/C) tout en améliorant la maniabilité.

Les éléments en béton armés des ouvrages hydrotechniques, notamment ceux de stockages (Réservoirs, bassins, ...) ont un généralement un ferrailage assez dense nécessitant une ouvrabilité élevée du béton pour permettre un coulage optimal sans ségrégation. De plus, comme on a pu le voir précédemment, une des solutions les plus efficace pour augmenter

l'étanchéité du béton est la réduction du rapport E/C. Cette solution n'est possible qu'avec l'utilisation d'un superplastifiant (ou plastifiant) permettant de maintenir l'ouvrabilité du béton souhaitée.

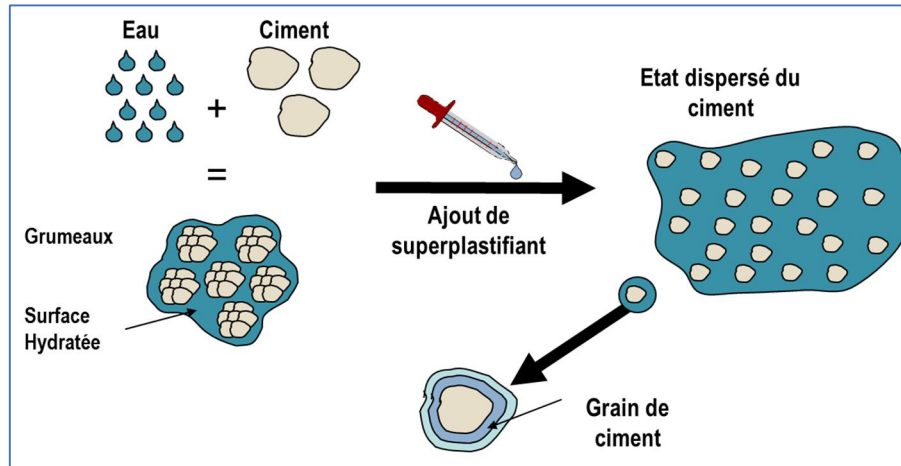


Fig. 4.7. Mécanisme d'action du superplastifiant

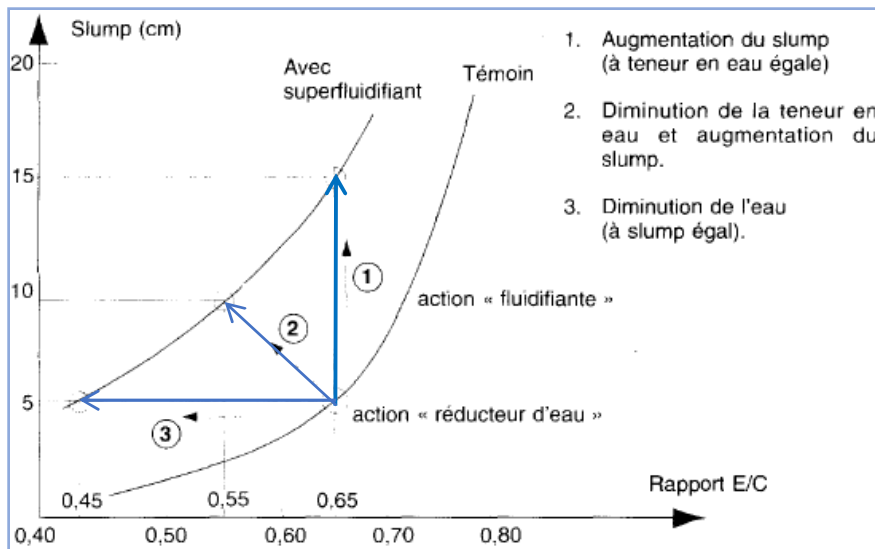


Fig. 4.8. Effet du superplastifiant sur l'ouvrabilité et le rapport E/C du béton

- *Hydrofuge de masse*

Ce sont des adjuvants qui, introduits dans la masse du béton, ont pour fonction principale d'en diminuer l'absorption capillaire en réduisant la porosité et la tortuosité (Figure 4.9). Il ne faut pas les confondre avec les hydrofuges de surface qui s'appliquent au rouleau sur le béton durci. Les hydrofuges de masse sont en général à base de stéarates solubles qui, en contact avec la chaux (CaOH_2) du ciment, forment des cristaux de stéarate de calcium insolubles qui viennent obstruer le réseau capillaire du béton (Figure 4.10). Pour que l'efficacité de l'hydrofuge soit

optimale, il faut que si le béton soit bien compact et homogène, et que la fissuration du béton soit maîtrisée.

Il est à noter que l'effet de l'utilisation d'un hydrofuge sur l'étanchéité du béton n'est que complémentaire, il est primordial d'utiliser un superplastifiant permettant de réduire de façon importante le rapport E/C qui reste le paramètre de premier ordre.

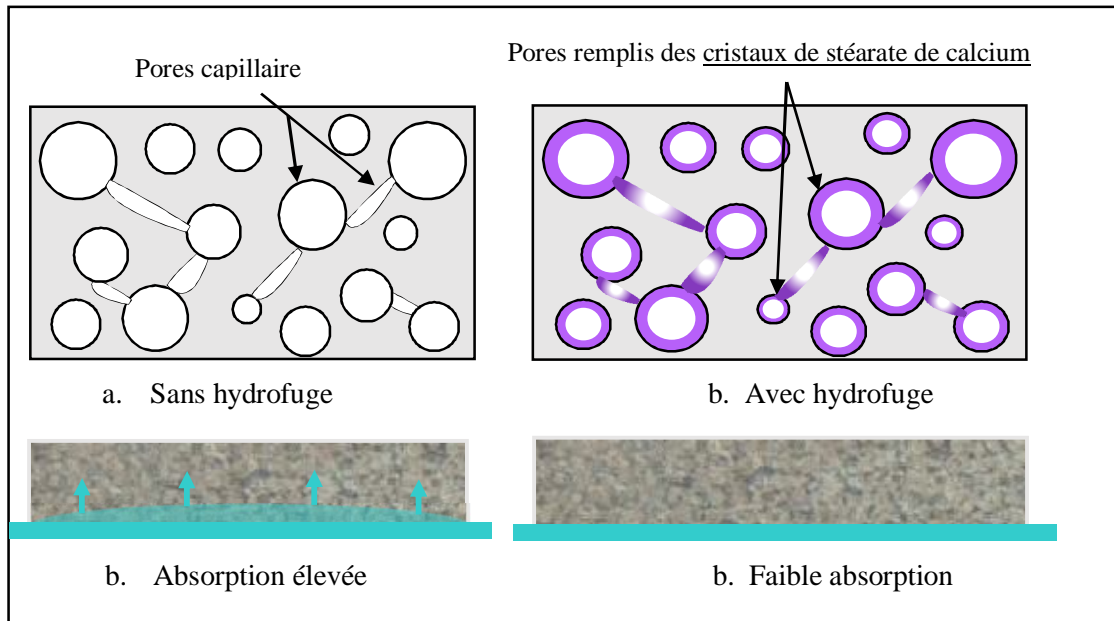


Fig. 4.9. Schéma de la structure poreuse de la pâte de ciment sans et avec hydrofuge de masse

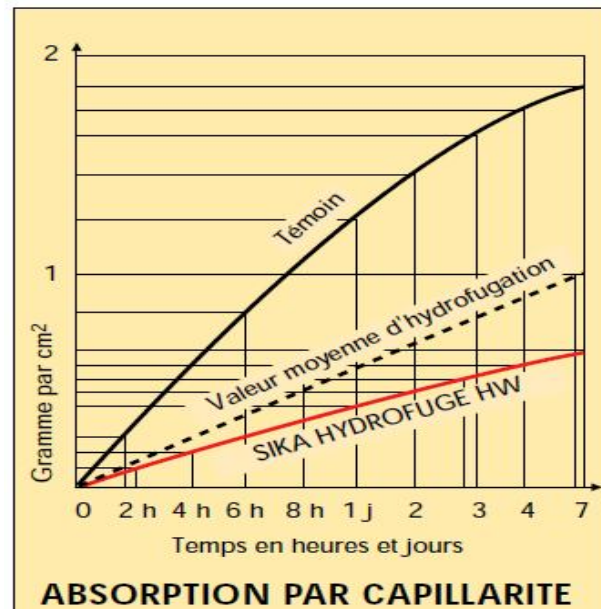


Fig. 4.10. Influence de l'hydrofuge de masse sur l'absorption d'eau capillaire du béton

4.2.4 Les additions minérales

Comme vu précédemment lors de la fabrication du ciment, des ajouts minéraux (Calcaire, pouzzolane, laitier, fumée de silice, ...) peuvent être utilisés et lui confèrent des

propriétés améliorées (bonne résistance chimique, faible chaleur d'hydratation, ...). Ces ajouts sont incorporés et broyés simultanément avec le ciment en usine. Les mêmes produits peuvent être utilisés comme addition au ciment (avec ou sans ajouts) et être ajoutés au béton lors de sa fabrication (malaxage). Ainsi les proportions de l'addition peuvent être choisies et adaptées aux besoins des propriétés du béton désirées (Ouvrabilité, résistance et durabilité).

Les additions minérales sont des poudres finement broyées d'origine naturel ou sous-produit industriel, elles sont classées en deux type :

- Additions de type I (Inertes) : Tel que le calcaire
- Additions de type II (à caractère hydraulique latent ou pouzzolanique) : Laitier, pouzzolanes, cendre volante, fumée de silice, ...

En fonction du type de l'addition en résulte deux effet sur le béton :

- *L'effet filler* : il s'agit d'un effet purement physique de remplissage des vides du mélange granulaire du béton (figure 4.11). De par sa finesse de mouture élevée, l'addition a tendance à combler les interstices entre les plus grosses particules squelette granulaire diminuant sa porosité et augmentant sa compacité. Ceci par ailleurs, a un effet positif sur l'hydratation du ciment.

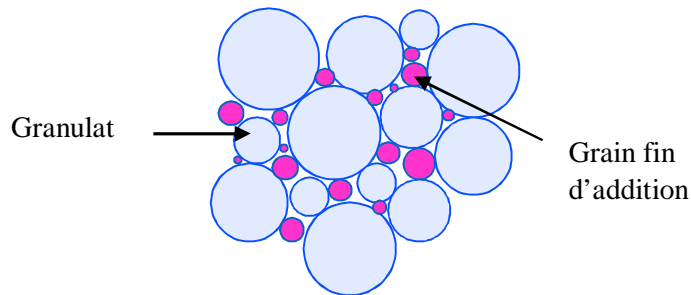


Fig. 4.11. Effet de remplissage des fillers

- *L'effet pouzzolanique* : Un matériau **pouzzolanique** est un matériau susceptible de libérer de la silice (S : SiO_2) en présence d'un porteur de chaux (C : CaO). La silice libérée se combine à la Portlandite CaOH_2 (libéré par l'hydratation du ciment) pour former des CSH (Gel de silicate de calcium hydraté). La consommation de portlandite non liante et soluble, au profit de CSH stable de fine porosité apporte à la matrice une meilleure résistance et durabilité.

Les deux effets apportés par les additions minérales, améliorent la résistance chimique du béton ainsi que ces propriétés de transfère (perméabilité et absorption capillaire).

Chapitre 5 :

Travaux Pratiques

Cette partie du document concerne les étudiants de 2^{ème} année second cycle. Ainsi, trois (03) TP en présentiel sont proposés pour mettre en évidence les notions théoriques étudiées auparavant, concernant les bétons utilisés pour mettre en œuvre les différents ouvrages hydrotechniques, nécessitant des soins particuliers quant aux propriétés mécaniques et physiques d'étanchéités.

TP N°1 : Conception d'un béton destiné aux ouvrages hydrauliques

TP N°2 : Mesure des propriétés d'étanchéité des bétons

TPN°3 : Essais Non Destructifs sur béton

TP N°1 : Conception d'un béton destiné aux ouvrages hydrauliques

Introduction

Le béton des ouvrages hydrauliques est en contact permanent avec l'eau. Cette eau est présente, soit :

- En grande quantité et s'introduit sous pression dans le béton,
- En faible quantité et pénètre dans le béton par remontée capillaire.

Dans les deux cas, sachant que tous les mécanismes de détérioration du béton requièrent la présence d'eau et/ou autres espèces nocives (oxygène, ions de chlore, ions de sulfate, acides, etc.), la présence d'eau dans le réseau capillaire conduit à une mauvaise durabilité du béton durci. De ce fait la composition d'un béton destiné à un ouvrage hydrotechnique est différente d'un béton classique. Ce dernier doit avoir une faible porosité, perméabilité et absorption capillaire.

Objectif

- ✓ Discuter les propriétés d'un béton destiné aux ouvrages hydrauliques,
- ✓ Discuter les paramètres de la composition du béton (Propriétés et les type de matériaux constitutifs et dosages) qui ont une influence directe sur la résistance et les propriétés d'étanchéité du béton,
- ✓ Proposer une composition de béton de performances élevées,
- ✓ Confectionner le béton proposé et comparer ces caractéristiques à l'état frais avec un béton ordinaire (de classe 25/30).
- ✓ Préparer des éprouvettes de différentes dimensions pour le TP n° 02 qui s'intéressera à la mesure des propriétés du béton à l'état durci.

I.1 Formulations du béton

A partir d'une composition d'un béton ordinaire (Tableau 5.1) étudié précédemment (en TP n°03 de la 1^{ière} année SC), les paramètres suivants seront discutés en utilisant des notions théoriques largement exposées dans les chapitres 3 et 4 du présent polycopié. Ainsi les paramètres suivants seront étudiés :

- ✓ Dosage en ciment
- ✓ Rapport E/C
- ✓ Adjuvants
- ✓ Addition

A partir de la discussion et avec prise en considération des différentes recommandations normatives exposés dans le chapitre 4, il est demandé aux étudiants de proposer quelques formulation d'un béton dit « de performance améliorées » en suivant la logique du tableau 5.2.

Tableau 5.1 : Composition d'un béton ordinaire déterminée selon la méthode de Dreux Goriss.

Désignation Béton	E/L	Liant (kg/m ³)		Agrégats (kg/m ³)		
		Ciment	Addition	Sable 0/5	G ₁ 8/15	G ₂ 15/25
Béton ordinaire B0	0,62	350	0	746,13	417,62	712,35

Tableau 5.2 : Etude paramétrique des bétons à performance améliorée

Désignation Béton		Agrégats (kg/m ³)			Dosage en ciment	Rapport $\frac{E}{C}$	Adjuvants	Addition Kg/m ³
		Sable 0/5	G ₁ 8/15	G ₂ 15/25				
Béton ordinaire	B0	746,13	417,62	712,35	350	0,62	0	0
Bétons à performance améliorée	B1	746,13	417,62	712,35	↗?	0,62	0	0
	B2	746,13	417,62	712,35	350	↘?	%	0
	B3	?	?	?	350	↘?	%	?
	B4	?	?	?	↗?	↘?	%	?

Avec :

- B0 : un Béton ordinaire « Béton de référence »,
- B1 : Augmentation de dosage en ciment C jusqu'à 400Kg/m³,
- B2 : Diminution du rapport E/C ; Ajouter des Adjuvants superplastifiant,
- B3 : Diminution du rapport E/C ; Ajouter des Adjuvants superplastifiant et hydrofuge,
- B4 : Diminution du rapport E/C ; Augmentation de dosage C ; Ajouter une Addition et des Adjuvants.

Pour ce TP, ne pouvant pas réaliser la 5 formulation proposées, on a proposé de réaliser seulement le béton ordinaire B0 et un Béton performant B2 avec une diminution de rapport E/C de 0,52 ou 0,42 (selon l'adjuvant utilisé). Ce choix est étayé par le fait que le paramètre rapport E/C est le plus influent sur les propriétés d'étanchéité.

I.2 Préparation du béton

I.2.1 Quantité de la gâchée

La gâchée exécutée au laboratoire pour des essais d'étude, doit être tel pour permettre d'obtenir un volume de béton compacté excédant celui des éprouvettes d'au moins 25 %. Le volume sera calculé par les étudiants selon le volume des éprouvettes à confectionner. Ainsi, les différents matériaux seront préparés et pesés.

I.2.2 Malaxage du béton

La procédure d'introduction des ingrédients et du malaxage du béton est rappelée dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Procédure normative d'introduction des ingrédients et du malaxage du béton

Introduction	Malaxage
1- Gros éléments 2- Liant (ciment + Addition) 3- Sable 4- Eau et adjuvant	1- Malaxer à sec pendant 1 min. 2- Ajouter une partie de l'eau de gâchage. 3- Malaxer pendant 1 min. 4- Ajouter le reste d'eau de gâchage + adjuvant superplastifiant. 5- Malaxer pendant 1 min.

I.3 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump test)

Réaliser un Slump-test des deux bétons confectionnés selon la procédure normative suivante :

1. Humidifier légèrement la plaque d'appui et huiler légèrement le moule et Fixer le moule.
2. Introduire le béton dans le moule en 3 couches et piquer 25 fois par couche.
3. Araser le moule.
4. Démouler le béton frais et mesurer l'affaissement « A ».
5. Les résultats sont interprétés selon le tableau suivant

Affaissement « A » [cm]	Classe	Désignation
0 à 4	Ferme	F / S1
5 à 9	Plastique	P / S2
10 à 15	Très plastique	TP / S3
>à 16	Fluide	F / S4

NB : Le résultat d'essai d'affaissement doit dans la même classe pour les deux types du béton étudié. Cela permettra une comparaison rationnelle des propriétés du béton à l'état durci dans le TP n°02. Une variation dans le dosage en superplastifiant permettra un bon réglage de l'affaissement du béton.

I.4 Confection des éprouvettes

- Huiler les moules :
 - Cylindrique 16x32
 - Cubique 15x15
 - Cubique 7x7

- Remplir les différents moules en deux couches avec à chaque fois un piquage de 25 coups à l'aide de la tige de piquage ou en utilisant l'aiguille vibration ou la table vibrante.

I.5 Présentation des résultats du TP, commentaires et conclusion

Il est demandé aux groupe d'étudiants (binôme ou autre) de :

- Présenter un résumé de l'influence des différents paramètres de la composition du béton sur ses propriétés de résistance et d'étanchéité,
- Présenter les différentes compositions proposées de béton à performance améliorée, avec des argumentations appropriées,
- Présenter les valeurs de l'affaissement des béton B0 (ordinaire) et B1 (amélioré) étudiée avec des commentaires appropriés

TP N°2 : Mesure des propriétés d'étanchéité des bétons

Introduction

Dans le TP précédent, deux bétons ont été confectionnés à savoir : un béton courant et un béton destiné aux ouvrages hydrauliques de performances supposées améliorées. Ceci a été possible grâce à une étude paramétrique sur les différents matériaux constitutifs du béton et leurs dosages de formulation.

Le présent TP propose de mesurer la propriétés physiques d'étanchéité des deux bétons confectionnés auparavant afin de confirmer les hypothèses émises et de voir l'efficacité du béton amélioré dans son rôle de matériau étanche lorsqu'il est utilisé dans un ouvrage hydraulique.

Objectif

- ✓ Rappeler les propriétés d'étanchéité du béton, présentés en détail dans le chapitre 2.
- ✓ Présenter et expliquer les essais de porosité à l'eau, l'absorption d'eau par capillarité et la pénétration d'eau sous pression,
- ✓ Présenter les méthodes de préparation des échantillons de béton avant ces essais,
- ✓ Réaliser les trois essais sur les deux bétons (courant et amélioré),

II.1 Absorption d'eau par capillarité

Le transfert d'eau dans un matériau poreux, dû à des tensions de surface liquide/solide/gaz dans les capillaires, est appelé absorption d'eau par capillarité. L'absorption capillaire dépend de la structure poreuse (porosité ouverte, taille et interconnexion des pores) et de l'état hydrique du matériau. Comme expliqué en détail dans le chapitre 2, la hauteur d'ascension h_i , selon la loi de JURIN, est inversement proportionnelle au rayon r_i du capillaire, par contre, la capacité d'absorption du liquide dans le capillaire est proportionnelle à son rayon r_i .

II.1.1 Préparation des échantillons

- Après démoulage, les éprouvettes de béton de 70 mm sont conditionnées en chambre humide (95% HR et T 20°C) pendant une période de maturation étudiée (de 15 à 28 jours selon le timing des TP) suivi d'un séchage dans l'étuve ventilée à 45°C, jusqu'à masse constante ($\Delta M < 0,1\%$ en 24 heures).
- Une hauteur de 1 cm de la surface latérale des éprouvettes est enduite par de la résine (ou silicone), pour permettre une pénétration d'eau unidirectionnelle (Figure 5.1).

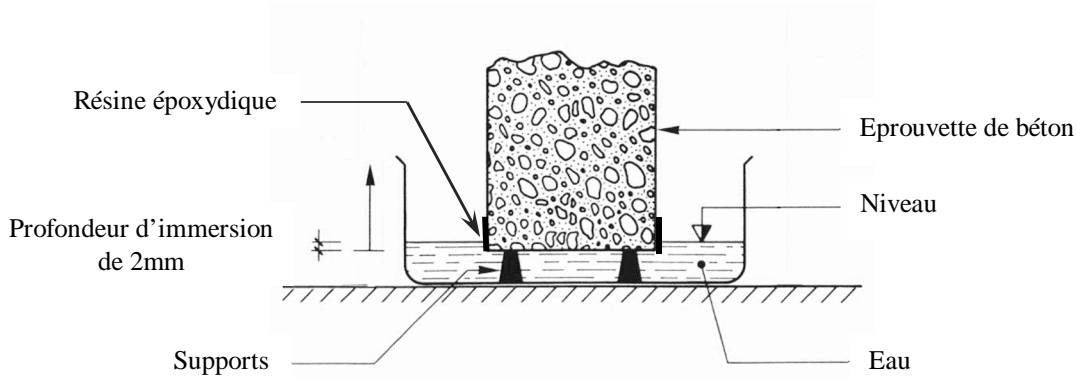


Figure 5.1 : Dispositif et Préparation de l'éprouvette pour l'essai de la capillarité

II.1.2 Conduite de l'essai

L'essai est conduit en suivant les termes de la norme EN 13057. L'éprouvette est placée sur deux appuis posés sur le fond d'un bac rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 2 ± 1 mm (à partir de la base de l'éprouvette). Le niveau d'eau doit être maintenu constant. La variation de la masse de l'échantillon est mesurée après 4, 9, 16, 25, 36, 49,64 minutes. Par manque de temps, les mesures après 1, 4, 8 et 24 heures ne sont pas faites dans le cadre du TP. La pesée des éprouvettes est effectuée après un essuyage à l'aide d'un chiffon légèrement humide afin d'enlever toutes les gouttes d'eau mouillant la surface.

II.1.3 Coefficient d'absorption

L'absorption d'eau par unité de surface « Ca_t », à un temps t est déterminée par l'équation 5.1,

$$Ca_t = \frac{M_t - M_o}{A} \dots\dots\dots(5.1)$$

Avec

A : Surface d'éprouvette en contact d'eau

M_t ; masse après un temps t

M_o : masse sèche.

L'absorption d'eau Ca_t est proportionnelle à la racine carrée du temps Equation (5.2)

$$Ca_t = S\sqrt{t} \dots\dots\dots(5.2)$$

Après calcul des différents Ca_t , on demande de :

- Tracer la courbe $Ca_t = f(t)$ (voir figure 5.2)
- Calculer le coefficient d'absorption « S » représentant la pente du tronçon linéaire. Le coefficient S indique la tendance du béton à s'imprégner d'eau par la seule absorption capillaire.

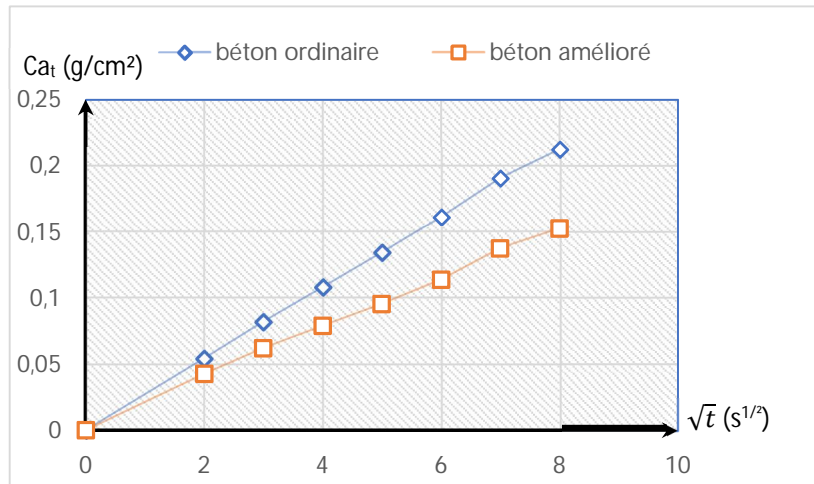


Figure 5.2 : Exemple d'une courbe $Ca_t = f(\sqrt{t})$

II.2 Essai de pénétration d'eau sous pression

L'essai de pénétration d'eau sous pression est un essai qualitatif qui permet d'apprécier la perméabilité à l'eau d'un béton donné. Cet essai ne peut en aucun cas remplacer l'essai de perméabilité à l'eau DARCI, mais offre la possibilité de comparer la performance d'étanchéité de deux bétons donnés. Pour plus de notions théorique, consulter la chapitre 2.

L'essai est effectué selon la norme EN 12390-8, sur les bétons étudiés, après la période de mûrissement dans l'eau à 20°C. Avant l'essai, les échantillon sont séchées à l'étuve ventilée à une température de 105°C jusqu'à masse constante ($\Delta M < 0,1\%$ en 24 heures).

L'essai, (figure 5.3), consiste à appliquer de l'eau sous une pression donnée sur la surface inférieure de l'éprouvette, pendant un certain temps et de mesurer en suite la profondeur de pénétration de l'eau (mm),

Pour ce TP, une pression de 3 bars est exercée durant 24 heures. À la fin de l'essai, l'éprouvette est fendue en deux parties par un essai de traction par fendage (essai Brésilien), la profondeur de la pénétration de l'eau est mesurée (mm). Pour chaque variable, deux éprouvettes sont testées et la valeur moyenne est calculée. Ainsi la profondeur de pénétration d'eau est comparée pour les deux bétons étudiés (ordinaire et à performance améliorées).

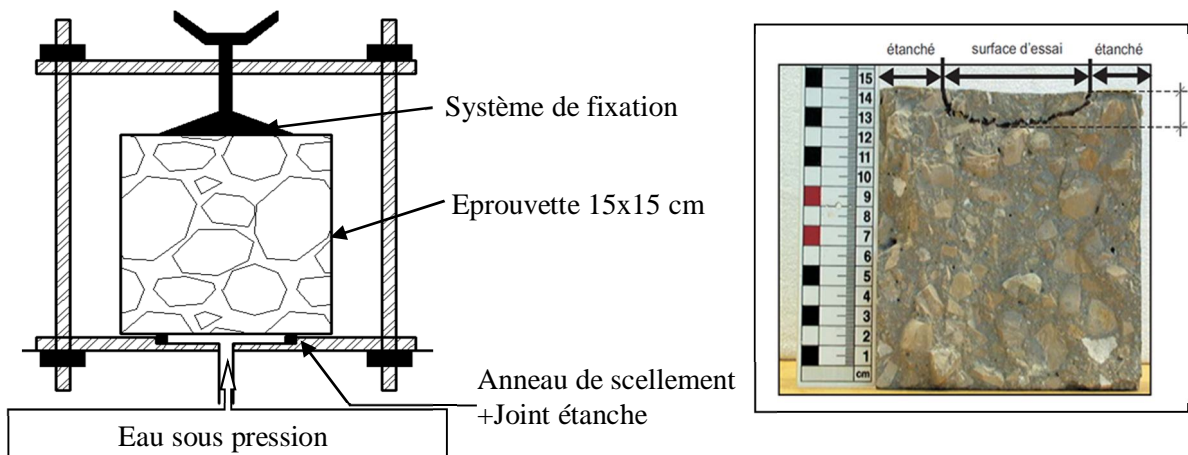


Figure 5.3 : Schéma d'une cellule de pénétration d'eau sous pression et l'éprouvette après l'essai

II.3 Essai de porosité totale à l'eau

La porosité accessible à l'eau est une propriété de première importance pour évaluer la durabilité du béton. Elle est déterminée par une immersion dans l'eau, une pesée hydrostatique et un séchage à l'étuve.

Les éprouvettes cubiques de 70 mm, sont séchées à l'étuve ventilée à une température de 105°C jusqu'à masse constante (variation de 0,1% après 24h). Ainsi l'échantillon est pesé et la masse sèche " M_{sec} " est déterminée. Pour obtenir la porosité accessible à l'eau par immersion " P_w ", les échantillons sont saturés par immersion dans l'eau jusqu'à ce que la variation en masse de 0,1% après 24 h (Norme belge NBN B-15-215) et sont pesés dans l'air " M_{sat}^{air} " et dans l'eau " M_{sat}^{eau} " (pesée hydrostatique).

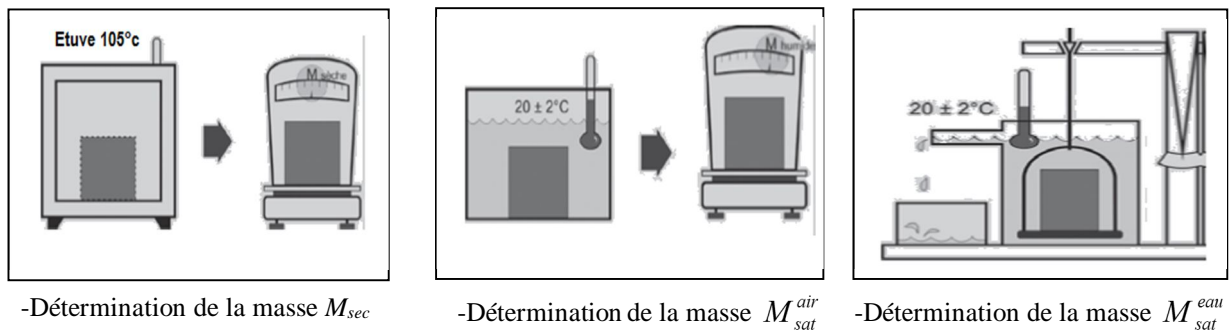


Figure 5.4 : Détermination des différentes masses

On définit P_w comme étant la porosité ouverte du matériau tel que :

$$P_w = \frac{M_{sat}^{air} - M_{sec}}{M_{sat}^{air} - M_{sat}^{eau}} \times 100 \dots \dots [\%]$$

II.4 Présentation des résultats du TP, commentaires et conclusion

Il est demandé aux groupe d'étudiants (binôme ou autre) de présentés les résultats des essais effectués sue les éprouvettes de béton :

- Absorption d'eau par capillarité
- Perméabilité à l'eau
- Porosité à l'eau

TPN°3 : Essais non destructifs sur Béton

Introduction

La mesure de la résistance du béton par les méthodes directes de laboratoire n'est pas souvent possible, notamment pour les éléments en béton armé déjà mis en place. Pour y remédier on fait souvent appel aux méthodes de mesure de la résistance indirecte (Scléromètre, ultrason, ...).

Objectif

- ✓ Faire connaître aux étudiants les principales méthodes indirectes d'estimation de la résistance du béton et les différentes raisons d'utilisation.
- ✓ Réaliser des essais indirects sur des échantillons de béton au laboratoire
- ✓ Exploitation et interprétation des résultats obtenus pour une bonne estimation de la résistance.
- ✓ Etablir une comparaison avec les résultats de résistances mesurées par un essai d'écrasement.

III.1 Essai au Scléromètre (Mesure de la dureté superficielle)

La méthode de dureté superficielle, selon la norme **EN 12504-2**, consiste en une auscultation du béton par un marteau activé par une quantité d'énergie (ressort) suivi de la mesure du rebondissement du marteau. Cette méthode, connue par **essai au scléromètre**, est appliquée pour des bétons dont la résistance en compression ne dépasse pas les **70MPa**. La méthode est plus efficace pour des bétons ayant un âge n'excédant pas **56 jours**.

Le principe de l'essai au scléromètre est basé sur le lien entre le rebond d'une masse élastique sur une surface donnée et sa dureté (figure 5.5). Dans cet essai l'appareil utilisé est un « scléromètre » : C'est une masse de 1.8 kg montée sur un ressort ayant une quantité potentielle d'énergie fixe. En compressant la tête du marteau sur la surface du béton testé, le ressort se comprime, et lorsqu'il est relâché, la masse frappe le béton en sa surface et rebondit. La distance parcourue par la tête du marteau, exprimée en pourcentage de l'extension du ressort initiale est appelée l'indice de rebondissement sclérométrique « **I** ». Cet indice est indiqué par un curseur de l'appareil.

Dans notre laboratoire, le scléromètre utilisé est de modèle « Schmidt modèle N standard », permet d'effectuer des mesures sur des bétons d'une résistance comprise entre **10 et 70 MPa**

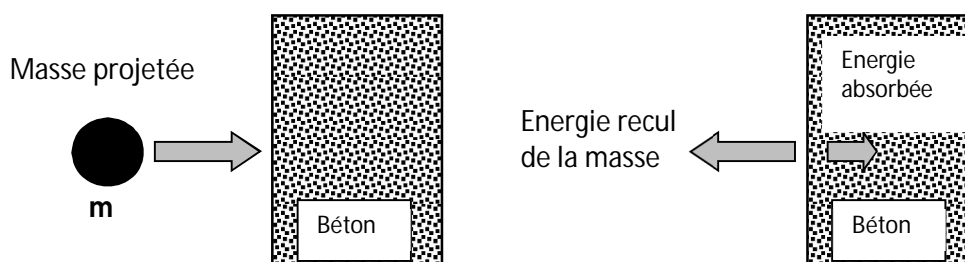


Figure 5.5 : Principe du Scléromètre

III.1.3 Conduite de l'essai

Les essais seront conduits sur une éprouvette de béton cylindrique 16-32. Les essais doivent être exécutés sur des surfaces propres ne présentant pas de porosité élevée, des nids de gravier, ou une texture grossière.

- **Préparation des surfaces du béton**

La préparation consiste à éliminer tout résidu (enduit ou peinture) adhérent à la surface. Ceci se fait par un ponçage si la surface comporte une couche d'impuretés superficielle friable. Par ailleurs, la surface doit être essuyée de toute trace d'eau avant l'essai.

- **Points de mesures**

Pour les éléments en béton des ouvrages, la surface de mesure doit être divisée en zones de surface d'au moins 400 cm², et structurée en une grille de points de mesure ayant pour espacement $d = 30$ à 50 mm. Dans notre TP, sur les éprouvettes testées, tracer des points uniformément répartis (Distance horizontale et verticale Variant de 3 à 4 cm) comme montré dans la figure 5.6.

- **Réalisation de l'essai**

- Placer la tête du marteau au point de la mesure : Différentes positions (Angles d'inclinaison) sont possibles selon la position de la surface à tester (Figure 5.7).
- Pousser l'appareil sur le point de mesure de l'élément à ausculter jusqu'à ce que le déclenchement de la projection de la bille ce produit,
- Presser le bouton poussoir de l'appareil,
- Tout en maintenant le bouton enfoncé, retirer l'appareil de la surface du béton,
- La sonde reste bloquée, relâcher le bouton poussoir ; et noter l'indice sclérométrique,
- Refaire la mesure sur les différents points de la zone à tester.

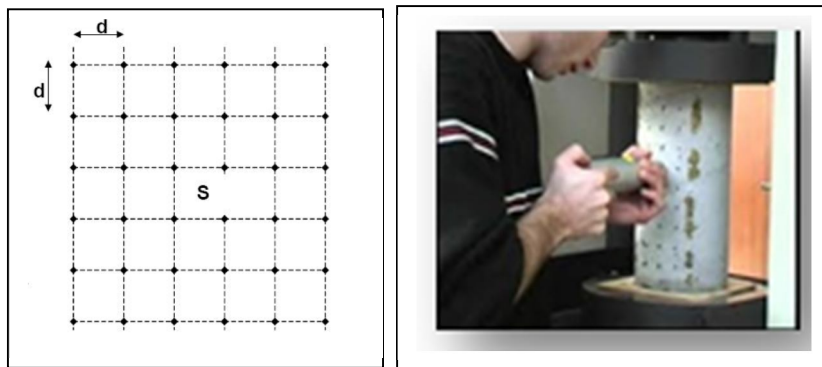


Figure 5.6 : Grille de mesure sur ouvrage et l'éprouvette

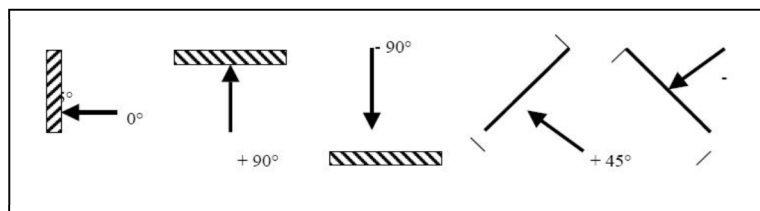


Figure 5.7 : Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter

III.1.4 Interprétations de résultats

L'indice sclérométrique « I_s » d'un élément ausculté est la moyenne de toutes les mesures effectuées sur la zone testée du béton. Une estimation de la résistance du béton est faite par le biais d'abaques ou de formules (tableau 5.4) en fonction de « I_s ».

Tableau 5.4 : Formules empiriques d'estimation de la résistance à la compression en fonction de « I_s ».

1	$R_c = (I_s)^2 / 32$	Avec R_c [Mpa]
2	$R_c = 0,013 \times I^{2,112}$	
3	$R_c = 0,4030 \times I^{1,2083}$	

III.2 Détermination de la vitesse de propagation du son « Essai à l'ultrason »

Cette méthode de diagnostic est utilisée pour estimer la résistance à la compression du béton et d'en apprécier l'homogénéité (vides, délaminages, microfissurations). Elle permet, en plus d'estimer la résistance du béton, de localiser des défauts et les malfaçons éventuelles dans le béton. Cela est possible du fait que les poches d'air emprisonnées dans le matériau transmettent que peu l'énergie des ultrasons. Ainsi, la valeur de la vitesse de propagation des ondes mesurée est inversement proportionnelle au volume des vides (porosité et imperfections).

Dans notre cas, l'objectif de cet essai est d'estimer la résistance du béton âgé de plus de 56 jours par ultrason tel que décrit par la **norme EN 12504-4** en mesurant la vitesse de propagation de l'onde traversant un élément de béton d'une épaisseur donnée.

III.2.1 Principe

Le principe de l'auscultation sonore consiste à mesurer le temps de propagation d'ondes entre deux points. L'appareil produit des ultrasons à partir d'un **émetteur**. Le temps nécessaire à l'onde pour atteindre le **récepteur** qui la convertit en signal électrique est ensuite mesuré par l'appareil. Connaissant la largeur de la pièce du béton testée (Distance de l'émetteur au récepteur), il est possible de calculer la **vitesse de propagation de l'onde** « V ».

- **Types de mesure**

L'essai d'ultrasons est réalisé selon le type de l'élément et la mesure ciblée. Principalement, deux types de mesures sont adaptées :

- **Mesures en transparence (Mesure directe)** : Dans ce cas, les sondes sont appliquées sur les deux faces de l'élément à tester (figure 5.8.a). Ce type de mesures est utilisée dans le cas d'éléments structuraux dont les deux faces sont accessibles tel que les poteaux ou les poutres.
- **Mesures en surface (Mesure indirecte)** : Ce type de mesures est utilisé pour les éléments surfacique et lorsqu'on n'a pas accès aux différents côté de la pièce tel que les dalles et éléments en longueur (figure 5.8.b). L'émetteur est maintenu en une position

fixe et le récepteur est déplacé progressivement à des distances espacées. Cette essai permet la détection de fissures.

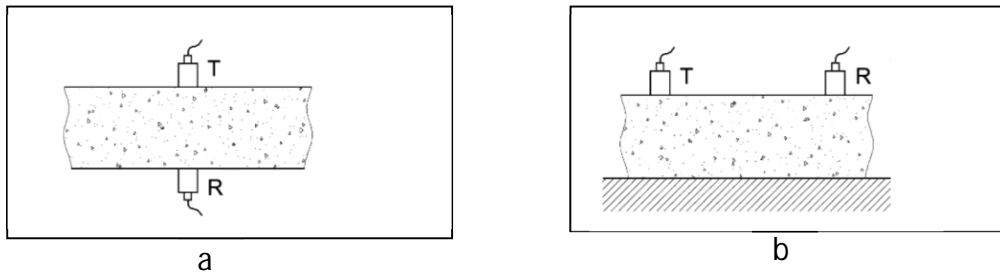


Figure 5.8 : Les différentes Manières de mesure avec

NB : Afin de limiter les interférences, un produit de couplage (Généralement la vaseline ou la graisse), sur la face de chaque transducteur est utilisé.

• **Mode opératoire de l'essai**

- Réaliser un maillage similaire des deux faces de l'éprouvette à tester. On veillera à espacer les points sur l'élément afin d'obtenir au moins quatre (04) mesures.
- Fixer l'émetteur et le récepteur des deux côtés et mesurer le temps de passage de l'onde sonique.
- Connaissant l'épaisseur « D en m » de l'éprouvette et le temps de passage « t en s », la vitesse « V en m/s » de propagation des ondes de chaque mesure est calculée. La moyenne des mesures effectuées est alors calculée.

• **Interprétation des résultats**

D'après les recommandations RILEM, une estimation qualitative de la résistance à la compression du béton peut être faite selon la vitesse ultrasonique « V », comme suit :

- Si : $V > 4000$ m/s alors le béton est de **très bonne qualité**
- Si : $3200 < V < 4000$ m/s alors le béton est de **bonne qualité**
- Si : $2500 < V < 3200$ m/s alors le béton est de **qualité mauvaise**
- Si : $V < 2500$ m/s alors le béton est de **qualité très mauvaise**

Par ailleurs, il existe des relations empiriques pour l'estimation de la résistance « Rc » du béton en fonction de V :

1	$R_c = 0,342 \times e^{(1,004 \times V)}$	avec Rc en [MPa] et V [Km/s].
2	$R_c = 36,72 \times V - 129,077$	

III.3 Méthodes combinées

Pour une meilleure estimation de la résistance du béton, il est possible de combiner les deux méthodes non destructives. Il s'agit de réaliser les deux essais (sclérométrie et ultrasonique) sur le même béton. Les résultats obtenus sont utilisés dans des approche graphiques ou analytiques pour estimer la résistance avec une bonne précision.

- Les figure 5.9 présente un exemple d'abaque permettant graphiquement une estimation de la résistance à la compression « Rc » en fonction de la vitesse ultrasonique 'V' et de l'indice sclérométrique 'Is'

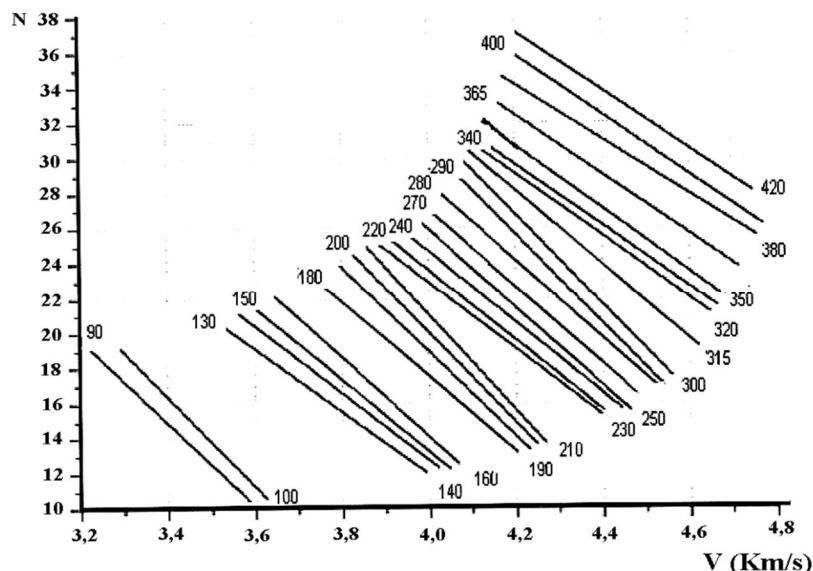


Figure 5 : Estimation de Rc par essais combinés (en fonction de V et I) CNERIB (1998).

Plusieurs **formules empiriques** ont été proposées dans la littérature. Tableau 5.5 ci-après énumère les plus pertinentes.

Tableau 5.5 : Formules empiriques d'estimation de la résistance en fonction de « Is » et de « V ».

N	Formules	Auteurs
1	$R_c = 0,745 \times I + 0,951 \times V - 0,544$	Tanigawa et al ; avec Rc [MPa] et V [m/s]
2	$R_c = 0,0158 \times V^{0,8254} \times I^{1,1171}$	Kheder et al (1998) ; avec Rc [bar] et V [Km/s]
3	$R_c = 18,6 \times e^{0,019 \times I + 0,515 \times V}$	Arioglu et al (1991) ; avec Rc [bar] et V [Km/s]
4	$R_c = 0,013 \times V^{1,756} \times I^{1,401}$	Boukhelkhal et Kenai (2015) ; avec Rc [MPa] et V [m/s]

III.4 Présentation des résultats du TP, commentaires et conclusion

Il est demandé aux groupe d'étudiants (binôme ou autre) de présentés les résultats des essais effectués sur les éprouvettes de béton :

- Essai sclérométrique : Indices, moyenne et résistance estimée par abaque et formules.
- Essai ultrasonique : Vitesses, moyenne et résistance estimée par abaque et formules.
- La résistance à la compression estimée par la méthode combinée,
- La résistance à la compression du béton étudié par écrasement
- Etablir les comparaisons nécessaires ainsi que les commentaires et conclusions

Références Bibliographiques

- Neville. M, Propriétés des bétons, Ed. Eyrolles, Paris, 2000.
- Baron. J et Olivier. J, Les Bétons ; Base et données pour leurs fabrications, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Ed Eyrolles, France, 1999
- Baroghel-bouny V, Caractéristiques des pâtes de ciment et des bétons ; Méthodes, Analyse, Interprétations, Rapport LCPC, 464 p., 1994.
- Baroghel-Bouny V., Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages- indicateurs de durabilité, Groupe de travail AFGC, Paris, 2004.
- Regourd M., L'hydratation du ciment portland, Le Béton Hydraulique, connaissances et pratiques, Presse de l'ENPC, Paris, 1995.
- Dreux G., Festa J., Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition, Eyrolles, France, 1998.
- Baron J., et Ollivier JP., La durabilité des bétons, ENPC, Paris, 1992.
- Ir Claude Ployaert, Recommandations pour la construction en béton des ouvrages d'épuration des eaux. Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, Bruxelles, 2006.
- Jean-Pierre Ollivier et Jean-Michel Torrenti, Chapitre 3 : la structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert, Dans "La durabilité des bétons" Presses des ponts, France, 2008.
- Gagné R.R., Cours de durabilité et réparation du béton (GCI-714), Université de Sherbrooke, Canada, 2002.
- Baron J. et Olivier J., Les Bétons ; base et données pour leurs fabrications, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Eyrolles, France, 1999.
- Benoît Thauvin et Michel Menguy. Guide d'utilisation du béton en site maritime, Centre Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales, France, 2008.
- Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, Groupe de travail AFGC/CEFRACOR, France, 2003.
- Norme EN 206-1, 2000 : Concrete — Part 1 : Specification, performance, production and conformity
- Norme EN 13057 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de l'absorption capillaire.
- Norme NF EN 12390-8, Juin 2019 : Essais pour béton durci - Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression
- Norme NBN B 15-215, 5 juin 2018 : Essais sur béton durci - Absorption d'eau par immersion.
- Norme NBN B 24-213, 1976 : Essais des matériaux de maçonnerie ; Absorption d'eau sous vide, Bruxelles,
- Norme NBN B 15-217, janv. 2009 : Essais des bétons - Absorption d'eau par capillarité.
- Norme NF EN 12504-2, Mars 2013. Essais pour béton dans les structures - Partie 2 : essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement
- Norme NF EN 12504-4, Mai 2005. P18-447. Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son